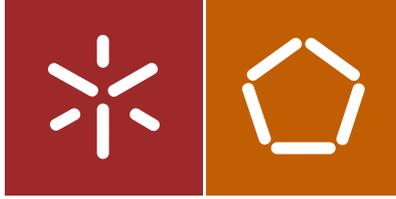




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Filipa Daniela Pereira Triunfante Martins

Estudo da Utilização de Cimento e Cinzas
Volantes em Materiais Granulares
Estabilizados com Emulsão Betuminosa



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Filipa Daniela Pereira Triunfante Martins

Estudo da Utilização de Cimento e Cinzas
Volantes em Materiais Granulares
Estabilizados com Emulsão Betuminosa

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Hugo Manuel Ribeiro Dias da Silva

“Tenta. Fracassa. Não importa. Tenta outra vez. Fracassa de novo. Fracassa melhor.”

Samuel Beckett

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação só foi possível devido ao esforço e dedicação de um conjunto de pessoas a quem gostaria de deixar o meu agradecimento.

Antes de mais, gostaria de expressar o meu agradecimento ao Laboratório de Vias de Comunicação da Universidade do Minho por todos os meios colocados à disposição e por todas as condições cedidas. Agradeço também o apoio laboratorial prestado pela empresa DST Group.

Não posso deixar de agradecer ao meu orientador, Professor Hugo Silva, por toda a sua orientação, pelos constantes conselhos, pela constante disponibilidade, apoio, incentivo, interesse, por todos os ensinamentos prestados ao longo de todo este trabalho e acima de tudo por estar sempre presente.

Ao Engenheiro Carlos Palha quero agradecer pela disponibilidade, pelos ensinamentos sem fim, pela paciência demonstrada, pelos telefonemas fora de horas, pela sua dedicação e pelos incansáveis momentos de humor que me proporcionou.

Ao Engenheiro Hélder Torres, quero expressar o meu maior agradecimento pela forma como me recebeu, pelo esforço demonstrado na realização de todo o procedimento, por todo o sacrifício para que todos os prazos fossem cumpridos, pelos constantes conselhos e acima de tudo agradecer pela amizade.

Não posso terminar os meus agradecimentos ao Laboratório sem agradecer à Sara Fernandes, à Liliana Abreu, à Daniela Palha e à Liliana Costa pelo excelente ambiente de sala, por todos os esclarecimentos prestados, por toda a entajuda constante e pelas conversas sem fim.

Aos meus pais e à minha avó por terem feito de mim aquilo que sou hoje, por terem sempre acreditado em mim, por nunca me terem deixado desistir, por me terem sempre apoiado nas minhas decisões, pelo incentivo, por toda a paciência e pelos conselhos sábios que sempre me foram guiando.

Ao meu irmão, cujo exemplo tento seguir, quero agradecer a presença constante mesmo quando as circunstâncias o fazem estar distante, a insistente pressão para fazer sempre mais e

melhor, mas acima de tudo por acreditar em mim e por me mostrar que tudo é possível com dedicação e coragem.

Ao Fernando, quero agradecer a presença permanente e o acompanhamento de todo este trabalho, todo o companheirismo, a incansável paciência e energética compreensão quando a minha própria paciência já estava abaixo de zero.

À Susana e à Rita por me lembrarem que as irmãs são as pessoas que nós escolhemos, por me dizerem as palavras certas nos momentos certos, por estarem sempre do meu lado, por me encorajarem e por me apoiarem em todas as circunstâncias.

À Zé, que mais do que uma amiga, uma prima sempre foi uma segunda mãe que está lá sempre, pelas eternas conversas, por me querer bem como a um dos filhos dela e porque sem ela o meu crescimento como pessoa não teria sido o mesmo.

Gostaria também de agradecer a todos os meus amigos que acompanharam todo este percurso, em especial à Isabel, à Joana e à Sofia, pela amizade ao longo de todos estes anos e por todos os discursos de motivação.

E por fim, ao meu avô, por olhar por mim!

Estudo da Utilização de Cimento e Cinzas Volantes em Materiais Granulares Estabilizados com Emulsão Betuminosa

RESUMO

No cenário de crise atual, é notória a preocupação com a redução dos custos na construção e reabilitação dos pavimentos. Posto isto, têm sido desenvolvidos variados estudos que envolvem a construção e reabilitação de pavimentos rodoviários por forma a minimizar os custos associados a estes processos. Nesse âmbito, tem-se procurado utilizar técnicas que possam ser aplicadas a frio, se possível *in situ*, de forma a garantir um menor custo e uma maior sustentabilidade dessas soluções.

No decorrer do presente estudo pretende-se desenvolver soluções que sigam esta tendência. Logo, a presente dissertação visa contribuir para a melhoria do desempenho das camadas de base e sub-base granulares dos pavimentos, em especial através do estudo de soluções económicas de estabilização das referidas camadas com emulsão betuminosa e com dois possíveis aditivos (cimento ou cinzas volantes). Nesse sentido, o principal objetivo deste trabalho é avaliar a influência que os dois aditivos, e a percentagem em que são usados, podem ter no desempenho final do material estabilizado.

Os materiais utilizados fixaram-se essencialmente no material granular a estabilizar (agregado britado de granulometria extensa ou ABGE), na emulsão betuminosa e nos dois aditivos já referidos. Entretanto, o desempenho foi avaliado através de ensaios de sensibilidade à água, ensaios de tração indireta e compressão cíclica uniaxial.

Com base nos resultados obtidos verifica-se que a introdução de cimento melhora significativamente o desempenho dos materiais granulares estabilizados com emulsão betuminosa nos ensaios de tração indireta e de sensibilidade à água das misturas realizadas, mesmo ao usar apenas 0,5% de cimento (embora o desempenho melhore claramente quando a percentagem de aditivo aumenta). As cinzas volantes também melhoram o desempenho, mas não de forma tão significativa, o que ocorre devido à reduzida capacidade de cimentação das cinzas volantes pelo facto destas não terem sido ativadas. No ensaio de compressão cíclica uniaxial, a resistência à deformação é superior à de uma mistura betuminosa tradicional a quente (controlo), o que é uma mais valia no estudo destas soluções.

Palavras-Chave

Materiais Granulares Estabilizados; Emulsão Betuminosa; Aditivos; Cimento; Cinzas
Volantes

Study of the Use of Cement and Fly Ash in Granular Materials Stabilized with Asphalt Emulsion

ABSTRACT

In the current crisis scenario, the concern about cost reduction in the construction and rehabilitation of pavements became clear. Thus, many studies have been developed involving construction and rehabilitation of road pavements in order to decrease the costs associated with these processes. In fact, cold paving techniques that can be applied in situ are being sought, in order to assure a lower cost and a higher sustainability of these solutions.

This study intends to develop solutions following this trend. So, the current thesis aims to contribute to improve the performance of granular base and sub-base layers of pavements, especially through the study of cheap solutions for stabilization of those layers with an asphalt emulsion and two possible additives (cement or fly ash). Thus, the main objective of this work is to evaluate the influence of these two additives, and their percentage use, on the final performance of the resulting stabilized material.

The materials used were essentially the granular material to be stabilized (dense graded aggregates), the asphalt emulsion and the two mentioned additives. Meanwhile, the material performance was evaluated through water sensitivity, indirect tensile strength and uniaxial cyclic compression tests.

Based on the obtained results it was observed that the introduction of cement significantly improves the performance of the granular materials stabilized with asphalt emulsion on the water sensitivity and indirect tensile strength tests, even when only 0.5% of cement is used (although the performance clearly improves when the additive percentage increases). Fly ash also improves the material performance, but not in a significant manner, and this occurs due to the reduced cementation capacity of fly ash (since it was not activated). In the uniaxial cyclic compression test, the resistance to deformation is higher than that of a traditional hot mix asphalt (control), which is a strength of the solutions studied.

Keywords

Stabilized Granular Materials; Asphalt Emulsion; Additives; Cement; Fly Ash

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento temático	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Conteúdo da dissertação	4
2. ESTADO DA ARTE SOBRE MATERIAIS GRANULARES ESTABILIZADOS COM EMULSÃO BETUMINOSA	5
2.1. Introdução	5
2.2. Técnicas de Pavimentação a Frio	6
2.2.1. Misturas betuminosas a Frio	7
2.2.2. Tratamento de Material Granular a Frio	9
2.2.3. Reciclagem a Frio	12
2.3. Vantagens e Desvantagens das Técnicas de Pavimentação a Frio	14
2.4. Materiais Utilizados nas Soluções de Pavimentação a Frio	16
2.4.1. Emulsão Betuminosa	16
2.4.2. Cimento.....	17
2.4.3. Cinzas Volantes	19
2.4.4. Água.....	20
2.4.5. Aditivos.....	20
2.5. Aditivos Utilizados para Melhoria do Desempenho do Material Granular.....	21
2.6. Ensaio Mecânicos para Avaliação do Desempenho das Misturas	22
2.6.1. Ensaio de Sensibilidade à Água.....	22
2.6.2. Ensaio de Tração Indireta (aumento da resistência com o tempo de cura).....	23
2.6.3. Ensaio de Compressão Uniaxial	24
3. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS	27
3.1. Introdução	27
3.2. Materiais	27
3.2.1. Agregado Britado de Granulometria Extensa.....	27
3.2.2. Emulsão Betuminosa	29

3.2.3. Água	30
3.2.4. Aditivos	31
3.3. Metodologia Experimental de Produção	32
3.3.1. Produção de Misturas para Formulação ou Determinação do Teor Ótimo de Emulsão	32
3.3.2. Produção de Misturas para Avaliação da Influência dos Aditivos.....	35
3.4. Metodologia Experimental de Caracterização do Desempenho	37
3.4.1. Avaliação da Sensibilidade à Água e Resistência à Tração Indireta.....	38
3.4.2. Evolução da Resistência à Tração Indireta com o Tempo de Cura das Misturas ABGETE	39
3.4.3. Resistência à Deformação pelo Ensaio de Compressão Uniaxial Cíclica.....	42
4. ANÁLISE DE RESULTADOS	45
4.1. Introdução.....	45
4.2. Determinação do Teor Ótimo de Emulsão das Misturas Tratadas.....	45
4.3. Influência da Percentagem de Aditivo na Sensibilidade à Água das Misturas Tratadas	49
4.4. Evolução da Resistência à Tração Indireta com o Tempo de Cura das Misturas Tratadas	54
4.5. Resistência à Deformação das Misturas Tratadas no Ensaio de Compressão Cíclica.....	60
4.5.1. Evolução da deformação permanente das diferentes misturas durante o ensaio.....	60
4.5.2. Avaliação da taxa de deformação das diferentes misturas durante o ensaio.....	67
4.5.3. Relação entre os resultados de deformação permanente das misturas ABGETE medidos com a placa de 98,5 mm e com a placa de 70 mm.....	74
4.5.4. Comparação da resistência à deformação das diferentes misturas ABGETE com cimento e com cinzas volantes estudadas neste trabalho.....	77
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPETIVAS FUTURAS	81
5.1. Conclusões	81
5.2. Trabalhos futuros.....	82

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 85

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Aplicação de misturas betuminosas a frio na reparação de pavimentos (Adaptado de UPM (2016)).....	7
Figura 2.2 – Exemplo de aplicação de microaglomerado betuminoso a frio (adaptado de Go Green (2012))	8
Figura 2.3 – Exemplos de solos ou camadas granulares estabilizadas com emulsão (ASMG, 2016).....	9
Figura 2.4 – Espalhamento do cimento para estabilização do material granular (Wirtgen, 2012).....	11
Figura 2.5 – Exemplo de reciclagem profunda do pavimento utilizando técnicas a frio <i>in situ</i> (adaptado de Wirtgen (2012))	12
Figura 3.1 - Agregado britado de granulometria extensa utilizado nas misturas	28
Figura 3.2 – Granulometria do ABGE utilizado neste estudo e fuso indicado para o material ABGETE no CE da EP (2009).....	29
Figura 3.3 - Emulsão betuminosa utilizada nas misturas realizadas e respetivo rótulo	30
Figura 3.4 - Aditivos utilizados na produção das misturas: cimento (esquerda) e cinzas volantes (direita).....	31
Figura 3.5 - Fase de produção das misturas ABGETE.....	34
Figura 3.6 - Compactador utilizado na realização dos provetes.....	34
Figura 3.7 – Aspeto final de alguns provetes produzidos com ABGE tratado com emulsão.....	35
Figura 3.8 - Textura conferida à mistura ABGETE aquando da sua produção.....	37
Figura 3.9 - Provetes imersos em água a 25 °C para o ensaio de sensibilidade à água.....	39
Figura 3.10 - Fases do método de ensaio para determinação da sensibilidade à água das misturas ABGETE: a) Ensaio de tração indireta; b) Deformações provocadas nos provetes.....	39
Figura 3.11 - Estufa utilizada para colocar os provetes a 40 °C	40
Figura 3.12 - Execução do ensaio de tração indireta.....	41
Figura 3.13 - Diferentes tipos de fissuras obtidas no ensaio de tração indireta para vários tempos de cura.....	42

Figura 3.14 - Equipamento utilizado para realizar o ensaio de resistência à compressão uniaxial cíclica	43
Figura 4.1 - Valores do ITS e da deformação de pico dos provetes secos das misturas tratadas produzidas para determinação do teor ótimo de emulsão	47
Figura 4.2 - Valores do ITSR e do volume de vazios das misturas realizadas para a determinação do teor ótimo de emulsão	48
Figura 4.3 - Valores do ITS e da deformação de pico dos provetes secos das misturas realizadas com cimento.....	50
Figura 4.4 - Valores do ITSR e do volume de vazios das misturas realizadas com cimento	51
Figura 4.5 - Valores do ITS e da deformação de pico dos provetes secos das misturas realizadas com cinzas volantes	53
Figura 4.6 - Valores do ITSR e do volume de vazios das misturas realizadas com cinzas volantes	54
Figura 4.7 - Evolução do ITS com o aumento do tempo de cura	57
Figura 4.8 - Evolução da deformação de pico com o aumento do tempo de cura	59
Figura 4.9 - Variação da baridade com o aumento do tempo de cura.....	60
Figura 4.10 – Evolução da deformação permanente em função do número de ciclos da mistura betuminosa de controlo	61
Figura 4.11 - Evolução da deformação permanente em função do número de ciclos da mistura ABGETE com 0,5% de cimento.....	62
Figura 4.12 - Evolução da deformação permanente com o número de ciclos da mistura ABGETE com 2,0% de cimento.....	63
Figura 4.13 - Evolução da deformação permanente com o número de ciclos da mistura ABGETE com 3,5% de cimento.....	63
Figura 4.14 - Evolução da deformação permanente em função do número de ciclos da mistura ABGETE com 0,5% de cinzas volantes	64
Figura 4.15 - Evolução da deformação permanente em função do número de ciclos da mistura ABGETE com 2,0% de cinzas volantes	65
Figura 4.16 - Evolução da deformação permanente em função do número de ciclos da mistura ABGETE com 3,5% de cinzas volantes	66
Figura 4.17 – Variação da taxa de deformação da mistura betuminosa de controlo ao longo dos vários ciclos de carga aplicados no ensaio de compressão cíclica.....	68

Figura 4.18 - Variação da taxa de deformação da mistura ABGETE com 0,5% de cimento ao longo dos vários ciclos de carga aplicados no ensaio de compressão cíclica.....	69
Figura 4.19 - Variação da taxa de deformação da mistura ABGETE com 2,0% de cimento ao longo dos vários ciclos de carga aplicados no ensaio de compressão cíclica.....	70
Figura 4.20 - Variação da taxa de deformação da mistura ABGETE com 3,5% de cimento ao longo dos vários ciclos de carga aplicados no ensaio de compressão cíclica.....	71
Figura 4.21 - Variação da taxa de deformação da mistura ABGETE com 0,5% de cinzas volantes ao longo dos vários ciclos de carga aplicados no ensaio de compressão cíclica.....	72
Figura 4.22 - Variação da taxa de deformação da mistura ABGETE com 2,0% de cinzas volantes ao longo dos vários ciclos de carga aplicados no ensaio de compressão cíclica.....	73
Figura 4.23 - Variação da taxa de deformação da mistura ABGETE com 3,5% de cinzas volantes ao longo dos vários ciclos de carga aplicados no ensaio de compressão cíclica.....	73
Figura 4.24 - Comparação da deformação permanente medida com a placa de 98,5 mm e de 70 mm na mistura ABGETE com 0,5% de cimento.....	74
Figura 4.25 - Comparação da deformação permanente medida com a placa de 98,5 mm e de 70 mm nas misturas ABGETE produzidas com 0,5%, 2,0% e 3,5% de cinzas volantes.....	75
Figura 4.26 - Comparação da taxa de deformação média medida com a placa de 98,5 mm e de 70 mm na mistura ABGETE com 0,5% de cimento	76
Figura 4.27 - Comparação da taxa de deformação média medida com a placa de 98,5 mm e de 70 mm nas misturas ABGETE produzidas com 0,5%, 2,0% e 3,5% de cinzas volantes	76
Figura 4.28 - Comparação da deformação permanente da mistura betuminosa e das várias misturas ABGETE produzidas neste trabalho com cimento e com cinzas volantes.....	77
Figura 4.29 - Comparação da taxa de deformação da mistura betuminosa e das várias misturas ABGETE produzidas neste trabalho com cimento e com cinzas volantes.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Principais técnicas de reciclagem (Baptista, 2006).....	12
Tabela 3.1 - Designação das misturas realizadas no estudo de formulação	32
Tabela 3.2 - Materiais utilizados nas misturas efetuadas para determinação do teor ótimo de emulsão	33
Tabela 3.3 - Designação das misturas realizadas para avaliar o efeito dos aditivos	35
Tabela 3.4 - Materiais utilizados nas misturas efetuadas com diferentes percentagens de cimento	36
Tabela 3.5 - Materiais utilizados nas misturas efetuadas com diferentes percentagens de cinzas volantes.....	36
Tabela 4.1 - Resultados obtidos na mistura realizada com 4,0% de emulsão betuminosa e 2% de cimento	45
Tabela 4.2 - Resultados obtidos na mistura realizada com 4,5% de emulsão betuminosa e 2% de cimento	46
Tabela 4.3 – Resultados obtidos na mistura realizada com 5,0% de emulsão betuminosa e 2% de cimento	46
Tabela 4.4 - Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura com 0,5% de cimento	49
Tabela 4.5 - Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura com 2,0% de cimento	49
Tabela 4.6 - Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura com 3,5% de cimento	49
Tabela 4.7 - Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura com 0,5% de cinzas volantes.....	52
Tabela 4.8 - Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura com 2,0% de cinzas volantes.....	52
Tabela 4.9 - Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura com 3,5% de cinzas volantes.....	52
Tabela 4.10 - Resultados do ensaio de tração indireta do material estabilizado ao usar 0,5% de cimento	55
Tabela 4.11 - Resultados do ensaio de tração indireta do material estabilizado ao usar 2,0% de cimento	55

Tabela 4.12 - Resultados do ensaio de tração indireta do material estabilizado ao usar 3,5% de cimento	55
Tabela 4.13 - Resultados do ensaio de tração indireta do material estabilizado ao usar 0,5% de cinzas volantes	56
Tabela 4.14 - Resultados do ensaio de tração indireta do material estabilizado ao usar 2,0% de cinzas volantes	56
Tabela 4.15 - Resultados do ensaio de tração indireta do material estabilizado ao usar 3,5% de cinzas volantes	56
Tabela 4.16 - Tabela resumo de todos os ensaios realizados ao longo do estudo da influência do tipo e percentagem de aditivos (cimento e cinzas volantes) no desempenho das misturas ABGETE.....	79

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento temático

Atualmente, o uso de produtos betuminosos em pavimentos rodoviários flexíveis é uma prática generalizada em todo o mundo. No entanto, é de consenso geral que existe a necessidade de otimizar o desempenho, funcional e estrutural, das misturas betuminosas perante os principais fenómenos a que estão sujeitas, devido ao aumento do tráfego em volume e agressividade (Minhoto et al., 2002), mas também devido às alterações climáticas que se têm verificado e que têm influenciado o comportamento dos materiais no pavimento.

Em Portugal, registou-se ao longo das últimas décadas um forte investimento na construção rodoviária. Estando concluída grande parte da rede rodoviária nacional planeada, tem-se vindo a observar um natural abrandamento na construção de novas estradas e um aumento das despesas de conservação e reabilitação das estradas em serviço (Baptista, 2006). Posto isto, no atual cenário de crise económica a nível global, é importante estudar soluções que respondam a esta necessidade de conservação com o menor custo possível. Na realização de todo este estudo foi esse princípio que se estipulou como propósito, ou seja, desenvolver uma solução com baixo custo que permitisse garantir, quando comparada com soluções tradicionais, uma maior sustentabilidade, o que também obriga a um bom desempenho a nível estrutural.

Os pavimentos rodoviários representam um importante e valioso património, e a sua gestão e manutenção exige a implementação de estratégias mais exigentes e criteriosas. Visto que a formação de rodeiras devido à deformação permanente das camadas betuminosas é uma das patologias que contribui para a degradação dos pavimentos rodoviários (Pais *et al.*, 2008), é importante perceber se as soluções a desenvolver também têm uma elevada resistência a este modo de degradação, uma vez que, pensa-se que a resistência conferida as camadas granulares através deste tipo de soluções, melhora bastante este tipo de soluções.

Outros objetivos fundamentais a ter em conta durante a execução de um pavimento rodoviário são a segurança, a economia e a comodidade. Assim, estes pavimentos devem apresentar características que permitam satisfazer não só requisitos de conforto ótico, acústico e de circulação como também a integridade estrutural do pavimento, de modo a minimizar-se a necessidade de intervenções de conservação (Monte, 2012).

A recuperação profunda dos pavimentos rodoviários ganhou um reconhecimento geral por causa das suas vantagens tanto a nível técnico, económico e ambiental. Junto com a recuperação profunda dos pavimentos rodoviários, também o uso de materiais tratados com cimento e betume tem aumentado nos últimos 10 anos, mesmo com a falta de especificações técnicas bem estabelecidas nos procedimentos de controlo. Este tipo de procedimentos dificultam a utilização desta solução (Bocci *et al.*, 2011).

Com o propósito de atingir os objetivos descritos anteriormente, é necessário garantir que as soluções de pavimentação são duráveis, que ao longo do seu tempo de vida possuem um bom desempenho, tanto a nível funcional como estrutural, e que na necessidade de intervenção é possível realizar a manutenção da rede de forma viável, não envolvendo muitos recursos. Assim, é essencial encontrar soluções de pavimentação mais sustentáveis e nas quais seja possível atingir estes objetivos com baixos custos e com um baixo impacto ambiental. Nesse sentido, a utilização de técnicas a frio e a possibilidade destas serem aplicadas *in situ* vão de encontro a esse conceito de sustentabilidade, o que faz com que este tipo de soluções possa ser uma mais valia. A estabilização de materiais granulares com emulsão betuminosa e/ou com ligantes hidráulicos surge como uma opção interessante e que se considerou importante estudar mais aprofundadamente nesta dissertação.

Todos os agentes estabilizadores têm como objetivo ligar partículas de agregados individuais para aumentar a resistência e a rigidez e/ou aumentar a impermeabilidade e durabilidade dos materiais. Alguns agentes são mais eficazes que outros quando usados com materiais específicos e alguns deles apresentam claras vantagens de custo, mas todos têm o seu lugar no mercado e a maioria apresenta melhor desempenho quando aplicado com recicladoras ou equipamentos de espalhamento modernos. A principal função destes estabilizadores é aumentar a resistência à carga, o que pode ser alcançado com o aumento significativo da resistência à tração e à compressão do material (o que justifica que estas sejam as duas principais propriedades mecânicas avaliadas neste trabalho) ou com a redução da sua plasticidade (Wirtgen, 2012).

A estabilização das camadas granulares pode ser realizada com recurso a agentes estabilizadores como é o caso da emulsão betuminosa, betume espuma, dos polímeros naturais e sintéticos, do cimento, da cal, das cinzas volantes, entre outros. Com a elaboração de soluções cada vez mais inovadoras, a utilização de betume nas estabilizações tem-se

tornado uma solução cada vez mais utilizada. Nas estabilizações de solos ou de camadas granulares o betume é utilizado na forma de emulsão betuminosa ou de betume espuma.

No caso do presente estudo, a estabilização das camadas granulares é feita com emulsão betuminosa, procedendo-se a uma otimização da formulação das misturas tratadas para lhes conferir maior resistência recorrendo a dois aditivos, neste caso, o cimento e as cinzas volantes.

1.2. Objetivos

O principal objetivo desta dissertação consiste no melhoramento do desempenho de materiais granulares estabilizados com emulsão, num processo de produção a frio, procurando melhorar o seu comportamento através da utilização de dois aditivos hidráulicos alternativos, cimento e cinzas volantes. Este tipo de materiais podem ser aplicados em camadas granulares dos pavimentos rodoviários, sendo que esta técnica pode ser aplicada *in situ* com redução dos custos associados ao transporte de materiais.

O estudo do benefício destes materiais granulares estabilizados (resultantes da junção de ABGE, emulsão betuminosa e água) consistiu na utilização de três percentagens de cimento e de cinzas volantes, para avaliar qual a percentagem ótima em que ambos devem ser utilizados e qual a percentagem destes materiais que é mais eficaz para aumentar a durabilidade deste tipo de misturas. A utilização de cinzas volantes procura ainda ir de encontro ao objetivo de reutilizar recursos e assim utilizar resíduos industriais como alternativa mais sustentável aos materiais usuais de construção (neste caso o cimento).

Para que os objetivos deste trabalho sejam cumpridos é necessário proceder à execução de várias misturas de material estabilizado com emulsão betuminosa e com os aditivos já referidos, em condições controladas de laboratório. Estas misturas de material estabilizado foram produzidas a frio e posteriormente compactadas com o compactador Marshall de forma a obter vários provetes de ensaio que foram caracterizados volumetricamente e mecanicamente através de três ensaios: Ensaio de Tração Indireta, no qual é possível obter a resistência à tração (ITS) e a deformação de pico; Ensaio de Sensibilidade à Água, no qual se obtém o índice de resistência conservada entre provetes condicionados e não condicionados (ITSR); Ensaio Uniaxial de Compressão Cíclica no qual é possível obter a evolução da deformação permanente bem como a taxa de deformação.

1.3. Conteúdo da dissertação

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, onde se incluí o presente capítulo, e cada capítulo está dividido em diversos subcapítulos. A organização dos capítulos é efetuada tendo em conta a seguinte divisão: Introdução, Revisão do Estado de Arte, Materiais e Métodos, Análise de Resultados e Considerações Finais.

No capítulo da Introdução é dado um conhecimento introdutório e geral sobre o tema bem como aos objetivos pretendidos com a realização desta dissertação. O presente capítulo serve de introdução à dissertação.

Na Revisão do Estado de Arte é apresentado o estado da arte acerca dos materiais granulares estabilizados com emulsão betuminosa e sobre a utilização de cimento e cinzas volantes como aditivos nestes materiais.

No terceiro capítulo é feita uma descrição dos materiais e dos métodos de ensaio utilizados na realização deste trabalho, e que demonstram que esta Dissertação tem uma vertente essencialmente laboratorial.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos no estudo dos materiais granulares estabilizados com emulsão betuminosa, fazendo-se a análise dos resultados de forma a compreender qual o efeito benéfico que a adição de cimento ou cinzas volantes pode ter nestas misturas.

No último capítulo são expostas as considerações finais, onde se faz uma conclusão ao trabalho realizado e onde se expõem possíveis ideias para trabalhos futuros com o intuito de continuar o estudo sobre este tema.

2. ESTADO DA ARTE SOBRE MATERIAIS GRANULARES ESTABILIZADOS COM EMULSÃO BETUMINOSA

2.1. Introdução

O objetivo deste capítulo prende-se com a compreensão mais aprofundada do tema desta dissertação e o porquê da sua escolha, fundamentando essa escolha com recurso ao estudo de diversos autores. No decurso do capítulo é possível compreender melhor o tema e contextualizar o objetivo do trabalho, assim como perceber qual a importância que as estabilizações a frio podem ter na pavimentação rodoviária e onde podem ser aplicadas. É importante realçar que ao longo do capítulo é possível adquirir conhecimentos relativos às soluções de pavimentação a frio existentes, as suas vantagens e desvantagens, os materiais utilizados durante as misturas realizadas e os aditivos utilizados para melhorar o desempenho das misturas.

As misturas a frio são misturas produzidas à temperatura ambiente. Podem ser obtidas variadas vantagens ambientais e custos bastante benéficos quando as misturas a frio substituem as misturas tradicionais a quente. No entanto, estas misturas têm mostrado características inferiores, tais como fracas propriedades a nível mecânico e elevada porosidade em comparação com as misturas a quente (Al Nageim *et al.*, 2012). As propriedades mecânicas dos materiais produzidos a frio incluem o estudo da deformação permanente e da resistência à fadiga, sendo que nos materiais granulares estabilizados a frio é habitual avaliar a resistência à tração indireta e a sensibilidade à água em alternativa à resistência à fadiga, no entanto neste trabalho realizaram-se também ensaios de resistência à fadiga.

Assim, torna-se importante estudar este tipo de misturas a frio de modo a melhorar as referidas características mecânicas, nomeadamente através da utilização de aditivos, de forma a garantir um maior sucesso na sua aplicação. No caso mais particular deste trabalho, o estudo incidiu sobre um dos materiais de pavimentação produzidos a frio, que são os materiais granulares estabilizados com emulsão betuminosa.

No Subcapítulo 2.2 serão abordadas as soluções de pavimentação “a frio” existentes, as suas características e funções. Ainda são explicadas os tipos de reciclagem “a frio” que existem e os tratamentos realizados aos materiais granulares a frio. Para além disso, será justificada a solução adotada para estudo neste trabalho.

No que se refere ao Subcapítulo 2.3, este descreve as vantagens e desvantagens do tipo de solução adotada, nomeadamente as técnicas de pavimentação a frio, e explicita a razão da escolha deste tipo de material com base nas vantagens que o mesmo apresenta.

No Subcapítulo 2.4 apresentam-se trabalhos anteriores sobre os materiais utilizados neste estudo, para se conhecer melhor as suas características e a influência que cada material tem na realização das misturas de material granular estabilizado com emulsão betuminosa, e aditivado com ligantes hidráulicos.

Para finalizar, no Subcapítulo 2.5 é feito um apanhado dos aditivos existentes para utilização nas técnicas de pavimentação a frio, e mais especificamente dos aditivos utilizados na realização deste trabalho. Além disso, também se expressa a função de cada um desses aditivos e qual o seu desempenho nas misturas ou nos materiais granulares tratados a frio.

2.2. Técnicas de Pavimentação a Frio

Ao nível das soluções de pavimentação a frio, existem diversas técnicas entre as quais se destacam as misturas betuminosas a frio, as estabilizações a frio e a reciclagem *in situ* a frio. No caso específico da solução de pavimentação estudada neste trabalho, a mesma prende-se com a estabilização de materiais granulares a frio. Como esta técnica faz parte do grupo de técnicas de pavimentação “a frio” optou-se, no decorrer deste Subcapítulo, por se dar alguma importância a outras soluções enunciadas “a frio”. Assim, no decorrer deste Subcapítulo vai dar-se relevância às soluções de misturas betuminosas a frio, ao tratamento ou estabilização de material granular a frio e à reciclagem de pavimentos a frio, que se encontram expostos nos seguintes Subcapítulos.

De facto, nas técnicas de pavimentação ditas a frio podem ser inseridas as misturas betuminosas a frio e as estabilizações de materiais granulares a frio, denotando que ambas as soluções possuem características diferentes, são misturas diferentes e comportam-se de forma diferente.

A realização deste trabalho de mestrado incide no estudo de materiais granulares estabilizados com emulsão betuminosa, podendo assim ser fabricada, espalhada e compactada à temperatura ambiente (Batista e Antunes, 2004). Posto isto, em seguida falar-se-á um pouco acerca das misturas betuminosas a frio e das estabilizações a frio.

2.2.1. Misturas betuminosas a Frio

As misturas betuminosas exibem dois componentes principais: o ligante betuminoso e os agregados. No caso particular das misturas betuminosas a frio, o ligante empregue no fabrico das misturas betuminosas é a emulsão betuminosa. Assim, neste tipo de misturas, a redução da viscosidade do betume (que à temperatura ambiente é praticamente sólido), é conseguida emulsionando-o com água, ou seja, fabricando emulsões betuminosas (Batista, 2004). Pela possibilidade que estas misturas apresentam de poderem ser aplicadas à temperatura ambiente, compreende-se a relevância que as misturas betuminosas a frio têm na pavimentação rodoviária.

A aplicação de misturas betuminosas a frio para a reparação rápida de pavimentos é geralmente a solução adotada em muitos casos (Figura 2.1). Existe no mercado uma enorme variedade de misturas betuminosas a frio para reparação rápida de pavimentos. Trata-se de misturas betuminosas a frio fabricadas com ligantes betuminosos modificados e com agregados naturais, que são comercializadas em embalagens, e que estão prontas a aplicar nos pavimentos. Porém, nem todos os fornecedores oferecem misturas com a mesma qualidade, resultando numa grande diversidade relativamente à durabilidade das reparações (Antunes *et al.*, 2013).



Figura 2.1 – Aplicação de misturas betuminosas a frio na reparação de pavimentos (Adaptado de UPM (2016))

Além da aplicação de misturas betuminosas a frio como material preferencial para reparação de pavimentos, também existem soluções em que estas misturas são aplicadas em revestimentos finos do pavimento. Esse tipo de soluções são os revestimentos superficiais e os

microaglomerados a frio, sendo que destas duas soluções apenas será descrita em seguida a técnica dos microaglomerados a frio por ser aquela que efetivamente é realizada com uma mistura a frio (dado que os revestimentos superficiais resultam da aplicação do ligante e dos agregados sobre a superfície do pavimento em diferentes fases e de uma forma separada).

A técnica de microaglomerado a frio surgiu, primeiramente, enquanto uma técnica de tratamento de selagem e impermeabilização. Com a melhoria do desenvolvimento de emulsões, maquinaria e aditivos, permitiu-se a utilização de maiores granulometrias em termos de agregados. Atualmente, os microaglomerados a frio são misturas fabricadas à temperatura ambiente com emulsão betuminosa, agregados e água, eventualmente pó mineral e aditivos, com consistência adequada para colocação em obra imediata, empregando-se em tratamentos superficiais de melhoria das características superficiais (textura superficial e resistência ao deslizamento) em aplicações de pequena espessura, habitualmente não superior a 1,5 cm, numa ou duas camadas (Figura 2.2). Para além de ser muito versátil, esta é uma técnica que permite alargar a longevidade do pavimento, conferindo não só melhorias em termos de textura como também em termos de impermeabilização e maior segurança rodoviária (Carvalho e Colas, 2013).



Figura 2.2 – Exemplo de aplicação de microaglomerado betuminoso a frio (adaptado de Go Green (2012))

Os microaglomerados a frio evitam perdas de textura superficial e corrigem pavimentos com falta de atrito. Os custos implicados são baixos, típicos de um tratamento económico e verifica-se uma grande rapidez de execução. Os microaglomerados a frio fabricam-se em misturadoras móveis, que realizam simultaneamente a aplicação da mistura. A mistura passa do misturador para a grade de espalhamento, que se desloca sobre a superfície a tratar, e que deverá ser munida de um dispositivo que reparta uniformemente a mistura a frio. Em

determinadas aplicações poderá ser previsto o emprego de compactadores de pneus (Carvalho e Colas, 2013).

2.2.2. Tratamento de Material Granular a Frio

A estabilização dos materiais granulares podem ser feitos com recurso a diversos estabilizadores, como já foi referido. Os materiais estabilizados a frio com emulsão (Figura 2.3) resultam da combinação de um agregado com uma emulsão betuminosa, permitindo, à temperatura ambiente, o seu manuseamento, aplicação e respetiva compactação, sendo armazenáveis na maioria dos casos (Branco, 2013).



Figura 2.3 – Exemplos de solos ou camadas granulares estabilizadas com emulsão (ASMG, 2016)

No caso específico deste estudo a estabilização será realizada com recurso unicamente a emulsão betuminosa (utilizando-se cimento ou cinzas volantes como aditivos), embora atualmente também se possa proceder à estabilização com betume espuma no que diz respeito às técnicas de estabilização com betume.

Relativamente ao desempenho deste tipo de soluções é importante ter em consideração uma série de fatores como a qualidade e consistência do material da camada, juntamente com os materiais que serão usados na estabilização. A adequação do agente estabilizador também é um fator bastante relevante, bem como a percentagem utilizada de agente estabilizador e de aditivos, além da espessura da camada em estudo. Como em todos os materiais estabilizados, o desempenho do produto tratado é amplamente ditado pela qualidade do material original e sua adequação ao tratamento com o agente estabilizador selecionado. Portanto, o procedimento de formulação da mistura visa determinar o potencial do material em termos de desempenho estrutural (resistência à deformação permanente) e durabilidade (resistência à

água e deterioração) (Wirtgen, 2012). De facto, com base na pesquisa bibliográfica, estas são as principais propriedades a avaliar neste tipo de misturas, o que justifica a metodologia posteriormente utilizada na fase experimental deste trabalho.

A estabilização dos materiais rodoviários é feita quando é necessário proceder a uma melhoria das propriedades mecânicas dos materiais granulares ou dos solos e/ou é necessário aumentar a durabilidade do pavimento.

Por exemplo, é importante perceber que é na fase de construção que o pavimento está submetido a condições mais severas, quer pelas maiores variações de humidade, quer pela maior variabilidade de cargas, aumentando a ocorrência de deformação permanente nos elementos presentes. Assim, no caso da estabilização de solos, basicamente pretende-se corrigir as propriedades naturais do solo, para que este tenha um bom desempenho do ponto de vista mecânico quer durante a construção, quer durante a vida útil da obra (Pereira, 2014).

Como em todos os materiais de construção, os materiais granulares estabilizados com ligantes betuminosos também possuem algumas desvantagens. Uma das principais desvantagens é que alguns materiais tratados com agente estabilizador betuminoso apresentam reduzidas propriedades de resistência retida, ou seja, são sensíveis à água e perdem resistência quando imersos em água. Esta característica pode ser tratada pela adição de um filler ativo, como a cal hidratada ou o cimento (Wirtgen, 2012), ou através de cinzas volantes, como no caso deste trabalho. Apesar disso, os materiais estabilizados com emulsão betuminosa possuem melhor resistência à água e durabilidade do que os materiais granulares (antes da estabilização).

Assim, esta dissertação procurou essencialmente analisar este problema da técnica de estabilização com emulsão, adicionando diferentes quantidades de cimento e cinzas volantes com o intuito de obter melhores resultados ao nível do ensaio de sensibilidade à água.

Também é importante entender que as misturas a quente são diferentes, na sua essência, dos materiais estabilizados com um ligante betuminoso. As misturas a quente são um material ligado continuamente, enquanto os materiais estabilizados com um ligante betuminoso são materiais ligados de forma não contínua. Os materiais estabilizados com cimento (ou com outros ligantes hidráulicos) também são muito diferentes dos materiais estabilizados com betume (Wirtgen, 2012)

Os materiais tratados com ligantes hidráulicos aplicados em camadas de sub-base e de base de pavimentos são essencialmente o solo-cimento, os agregados de granulometria extensa tratados com Cimento (que se designa abreviadamente por AGEC) e o betão pobre (Jiménez, 2007).

A adição de cimento num material granular (Figura 2.4) promove a sua rigidez, enquanto a adição de betume tende a promover a sua flexibilidade. Além de serem continuamente ligados, os materiais estabilizados com cimento são propícios à retração que se manifesta em fendilhamento em bloco nessa camada, o que é agravado pela repetição de cargas. A estabilização com cimento aumenta a resistência e a rigidez mas introduz fendas por retração, enquanto a emulsão betuminosa aumenta a coesão em relação aos materiais granulares (Wirtgen, 2012).



Figura 2.4 – Espalhamento do cimento para estabilização do material granular (Wirtgen, 2012)

As camadas com materiais que não empregam estabilização com ligante hidráulico ou betuminoso são camadas que recebem estabilização puramente mecânica por efeito de compressão e adensamento dos materiais constituintes. De facto, quando os materiais granulares são bem graduadas, dizemos que são estabilizadas granulometricamente. As camadas desse tipo, compostas por agregados, por solos ou, ainda, por uma mistura de ambos, são diversas vezes utilizadas em bases, sub-bases e, eventualmente, em reforços de subleitos de pavimentos (Balbo, 2007).

Os materiais granulares a aplicar em camadas de sub-base ou de base dos pavimentos são agregados de granulometria extensa, de produção direta, ou recompostos em central (EP, 2009). Os materiais não ligados (granulares) em pavimentos flexíveis apresentam um tipo de comportamento dependente da tensão. Isso significa que quando confinados em uma camada de pavimento compactada, as características efetivas de rigidez aumentam à medida que o seu estado de carga aumenta.

2.2.3. Reciclagem a Frio

A reciclagem a frio é o termo usado para a recuperação e reutilização de materiais de um pavimento existente, sem a adição de calor. Diferentemente da reciclagem a quente, que se limita ao aquecimento e à reutilização de material betuminoso do pavimento, o campo da reciclagem a frio (também conhecido como “reciclagem a frio *in situ*”) goza de uma ampla gama de aplicações, desde camadas menos espessas que compreendem principalmente o material betuminoso, até camadas mais espessas que incluem dois ou mais materiais diferentes do pavimento, tal como se exemplifica na Figura 2.5 (Wirtgen, 2012).



Figura 2.5 – Exemplo de reciclagem profunda do pavimento utilizando técnicas a frio *in situ* (adaptado de Wirtgen (2012))

Atualmente, existem diversas técnicas de reciclagem dos materiais fresados do pavimento, que se podem distinguir, por exemplo, quanto à localização dos trabalhos de reciclagem (*in situ* ou em central), quanto ao ligante utilizado (betume, emulsão betuminosa, cimento, entre outros), e conseqüentemente, quanto à temperatura de fabrico da mistura reciclada (a quente, semi-quente e a frio), como se resume na Tabela 2.1 (Nunes, 2008).

Tabela 2.1 - Principais técnicas de reciclagem (Baptista, 2006)

Tipos de Reciclagem	Local de Mistura
---------------------	------------------

	<i>In Situ</i>	Em Central
Reciclagem a frio com cimento	Sim	Não
Reciclagem a frio com emulsão betuminosa	Sim	Sim
Reciclagem a frio com betume-espuma	Sim	Sim
Reciclagem semi-quente com emulsão betuminosa	Não	Sim
Reciclagem a quente	Sim	Sim

A reciclagem de pavimentos *in situ* a frio é precisamente uma dessas técnicas, constituindo, comparativamente à solução tradicional de reabilitação de pavimentos (reforço do pavimento com uma camada em mistura betuminosa a quente, após uma eventual fresagem das camadas fendilhadas do pavimento existente), uma solução extremamente atraente do ponto de vista ambiental, pois alia o facto de proporcionar uma significativa redução da emissão de poluentes e poupança de energia, com o facto de favorecer a economia de matérias primas e prevenir a produção de resíduos, uma vez que o pavimento é utilizado como fonte de matéria prima (Batista e Antunes, 2006).

As especificações para a reciclagem a frio *in situ* com emulsão betuminosa variam entre si e envolvem um largo leque de tópicos tais como: materiais, equipamentos, métodos construtivos, compactação, condições atmosféricas, controlo de tráfego, entre outras (Nunes, 2008).

Quando se está perante pavimentos de forte espessura de material granular, com camadas betuminosas degradadas, a reciclagem *in situ* a frio com cimento poderá constituir o processo mais económico e um dos mais adequados para grande parte dos pavimentos existentes em Portugal. Da mistura do material fresado com o ligante resulta uma nova camada granular tratada com cimento, do tipo “agregado de granulometria extensa tratado com cimento ou AGECE”, a qual apresentará uma resistência bastante mais elevada que qualquer das anteriormente existentes no pavimento antigo (Branco *et al.*, 2011).

A reciclagem *in situ* a frio com emulsão betuminosa é uma técnica semelhante à reciclagem com cimento, variando apenas o ligante que é uma emulsão betuminosa de cura lenta (Baptista, 2006). Neste tipo de reciclagem, os materiais fresados do pavimento são processados sem o desperdício de energia para o aquecimento dos mesmos, sendo-lhes adicionado como ligante, uma emulsão betuminosa e eventualmente agregados, agentes rejuvenescedores ou estabilizantes químicos e outros materiais corretivos (Nunes, 2008).

Uma baixa variabilidade dos agregados obtidos por fresagem do pavimento é muito importante para o sucesso da reciclagem, e por esta razão os trechos em manutenção devem ser selecionados para garantir a máxima homogeneidade. Neste sentido, a reciclagem *in situ* contribui para reduzir essa variabilidade, pois não necessita de armazenamento dos materiais. A separação em *stocks* exige um maior controlo de tal forma que estas características variáveis dos agregados influenciem da menor forma possível as misturas recicladas (Silva, 2011).

Por outro lado, na reciclagem a frio em central, após a fresagem das camadas do pavimento existente, o material é transportado para central onde é misturado com a emulsão betuminosa à temperatura ambiente, seguindo-se o transporte e aplicação na obra de proveniência ou noutra obra (Baptista, 2006). É primordial ter em atenção que uma vantagem importante é que a realização deste tipo de reciclagem apenas necessita de centrais relativamente simples, pois não necessita de unidades de aquecimento para os diferentes materiais.

Uma das vantagens importantes da técnica de reciclagem *in situ* a frio é que pode-se tratar a maioria das patologias que os pavimentos apresentam quando alcançam um elevado estado de degradação, particularmente se forem atingidas as camadas granulares. No caso do fendilhamento, consegue-se erradicar a propagação de fendas melhorando o pavimento em termos estruturais com a redução dos custos associados no transporte de materiais assim como nos gastos energéticos com os equipamentos envolvidos. A vantagem ambiental mais significativa é não ser poluente, e a vantagem funcional está em proporcionar uma melhoria na qualidade e conforto de utilização do pavimento (Nunes, 2008). Entretanto, na reciclagem *in situ* também existem limitações de ordem meteorológica, que devem ser levadas em conta durante o período de cura.

As misturas recicladas apresentam melhorias mensuráveis na resistência após a construção, devido à cura dos aditivos de reciclagem e/ou modificadores, e redução na percentagem de vazios com a passagem do tráfego. A taxa de aumento da resistência das misturas recicladas é maior durante os primeiros meses após a construção, mas continua aumentando até dois anos (Silva, 2011).

2.3. Vantagens e Desvantagens das Técnicas de Pavimentação a Frio

De uma forma mais simples, as misturas a frio são normalmente comparadas com as misturas a quente tanto nos gastos energéticos como na emissão de poluentes, aspetos nos quais

apresentam claras vantagens. Por outro lado, a principal desvantagem continua a ser o menor desempenho mecânico dessas misturas.

As estabilizações a frio, em estudo nesta dissertação, bem como as misturas a frio têm uma vantagem enorme face as misturas ditas a quente, que é o facto de não ser necessário o aquecimento do ligante betuminoso e dos agregados tanto para o fabrico como para a aplicação em obra dessas misturas a frio. Outras vantagens entre estes dois tipos de misturas prende-se com a redução dos gastos energéticos e a redução da emissão de poluentes, além da possibilidade da utilização de centrais de menor complexidade que podem ser instaladas temporariamente no estaleiro da obra, proporcionando desta forma uma redução dos custos e dos tempos de transporte da obra e uma maior facilidade na utilização dos agregados locais. No entanto, as misturas a frio, quando comparadas com as misturas a quente, têm uma grande desvantagem, uma vez que as misturas a quente, quando colocadas em obra, apresentam quase de imediato características “finais” para que possam ser dimensionadas. Isso não acontece com as misturas a frio, que habitualmente precisam de algum tempo de cura até atingirem um melhor desempenho, que mesmo assim ainda não consegue ser comparável ao observado nas misturas produzidas a quente (Batista e Antunes, 2004).

Os materiais de pavimentação para misturas a frio são definidos utilizando agregados e ligante frios. Ao eliminar a necessidade de aquecer os grandes volumes de agregados criam-se poupanças substanciais, quer a nível financeiro quer a nível ambiental, comparativamente com o que é conseguido nas tradicionais misturas a quente. Além disso, como o funcionamento do material não está relacionado com a temperatura da mistura, as misturas a frio são facilmente transportáveis e são ideais para uso na construção e manutenção de estradas rurais, eliminando a necessidade de centrais portáteis de misturas a quente (Branco, 2013).

Outra das vantagens das misturas a frio prende-se com a alta trabalhabilidade devido ao estado fluído do ligante à temperatura ambiente, bem como ao facto de serem menos agressivas para o meio ambiente, e retardarem o endurecimento prematuro do betume por oxidação, o que geralmente é constatado nas centrais em misturas a quente (Montanari, 2007).

As vantagens das misturas a frio durante o seu fabrico prendem-se com o facto dos agregados poderem ser utilizados sem serem aquecidos, do fabrico deste tipo de misturas ser bastante

mais simples e barato, podendo ser feito em central ou *in situ* usando uma central móvel. Assim, as misturas a frio são mais sustentáveis do que as misturas a quente (Rocha, 2011).

Um aspeto negativo e muito importante a considerar no que respeita às misturas a frio tem a ver com a sua compactação mais difícil em obra. Na execução de camadas densas a frio tem-se verificado que existem dificuldades na compactação, devendo ser prestado especial cuidado na seleção dos equipamentos a utilizar em obra para esse fim, e do teor em água da mistura durante a sua compactação (Batista, 2004).

No que diz respeito as vantagens, é importante realçar que o agregado se pode encontrar ligeiramente húmido, facilitando o seu envolvimento com o ligante, não sendo necessário, como já se referiu, o aquecimento dos agregados. Relativamente aos efeitos ambientais, também possui diversas vantagens, como é o caso da emissão dos gases que são menos comprometedores em relação as misturas a quente. Como é de esperar, as misturas a frio também reduzem o risco de incêndio, explosões e até mesmo acidentes de trabalho (Montanari, 2007).

2.4. Materiais Utilizados nas Soluções de Pavimentação a Frio

Neste Subcapítulo faz-se uma síntese dos materiais utilizados nas soluções de pavimentação a frio, acerca das suas características e das suas funções. Mostra-se também qual é a utilização mais usual de cada material em cada tipo de mistura. Os materiais utilizados durante do trabalho experimental que originou esta dissertação foram os seguintes: emulsão betuminosa, água e aditivos, como é o caso do cimento e das cinzas volantes.

2.4.1. Emulsão Betuminosa

A emulsão betuminosa é o material fundamental no trabalho apresentado nesta dissertação, pois faz a ligação entre toda a mistura. As emulsões deverão estar de acordo com Norma Europeia EN 13808, que especifica os requisitos técnicos e classes de desempenho. A designação das emulsões traduz-se numa expressão alfanumérica, que indica as características mais importantes das emulsões betuminosas catiónicas (as mais utilizadas), nomeadamente, a carga das partículas, o teor nominal em ligante, o tipo de ligante e o índice de rotura (EP, 2009).

As emulsões betuminosas podem ser definidas como dispersões, relativamente estáveis, de gotículas de betume (fase dispersa ou descontínua) num meio aquoso (fase contínua). Assim, a sua composição, e conseqüentemente as suas propriedades e tipo de aplicação, são condicionadas pelas proporções das duas fases. Como foi dito, a fase descontínua é constituída por betume, o qual foi previamente dividido em pequenas partículas por um moinho coloidal, dando-se a mistura das duas fases em condições pré-definidas (Nunes, 2008).

A utilização de emulsões betuminosas é comum nos trabalhos de pavimentação, principalmente quando se aplicam misturas a frio, regas betuminosas ou revestimentos superficiais. Uma emulsão betuminosa é constituída por um sistema de duas fases composto por dois líquidos imiscíveis, betume e água, que se mantém estável devido à adição de um emulsionante (que se distribui à volta dos glóbulos de betume e estabelece uma carga electrostática que garante a permanência destes em suspensão até à rotura da emulsão (Costa, 2012).

2.4.2. Cimento

O cimento (designado CEM) é o principal ligante hidráulico utilizado em misturas a frio que não utilizam um ligante betuminoso. Segundo a norma NP 206 o cimento caracteriza-se por ser um “material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água, forma uma pasta que faz presa e endurece em virtude das reações e processos de hidratação e que, depois de endurecer, mantém a sua resistência e estabilidade mesmo debaixo de água”. Os cimentos CEM referidos nas normas europeias são constituídos por diferentes materiais e têm uma composição estatisticamente homogénea, que resulta dos processos de produção e de manuseamento do material de qualidade assegurada (EP, 2009).

Para a sua aplicação na construção de pavimentos rodoviários foi normalizada a designação CEM e os cimentos foram agrupados em cinco tipos principais:

- CEM I – Cimento Portland;
- CEM II – Cimento Portland composto;
- CEM III – Cimento de alto-forno;
- CEM IV – Cimento pozolânico;
- CEM V – Cimento composto (Santos, 2010).

Os cimentos mais usados em trabalhos de pavimentação são os da classe de resistência 42,5 e eventualmente os da classe 32,5, ambos do tipo CEM I. A adição de cimento (ou cal) também pode ser feita aos solos que apresentem propriedades adequadas, destinando-se nesse caso à constituição de camadas de sub-base (Costa, 2012).

A estabilização com cimento aplica-se tanto a solos coesivos como a solos incoerentes, mas para estes obtêm-se melhores resultados. Há duas vias para a utilização deste tipo de estabilização. Uma com pequenas quantidades de cimento (3% ou 4% de teor em cimento), em que se visa essencialmente diminuir a suscetibilidade à água do solo, e aumentar a resistência, embora ligeiramente. Trata-se da técnica chamada de “solo tratado com cimento” e, em geral, usa-se em estradas com pouco tráfego. Outra possibilidade consiste em utilizar dosagens de cimento maiores, conduzindo a um material de resistência mais elevada e com características próprias, o “solo-cimento” (Branco *et al.*, 2011).

De facto, a ação estabilizante do cimento depende do teor deste na mistura. Um baixo teor de cimento (entre 0,5 e 4,0%) conduz a uma diminuição da plasticidade do solo que pode, ou não, conduzir a um aumento da resistência mecânica do mesmo. Esta ação modificadora destina-se essencialmente a solos argilosos. Por outro lado, quando ao solo é adicionado um teor de cimento maior (5 a 15%), pretende-se melhorar essencialmente o seu comportamento mecânico graças à ação aglutinante do cimento. Os solos a que se destinam esta estabilização são principalmente os arenosos e os poucos argilosos, sem presença de matéria orgânica (Costa, 2012).

O tratamento das camadas inferiores através da adição do cimento aos solos e/ou a ABGE destinados a camadas de sub-base e base, diminui a deformabilidade da estrutura final do pavimento, permitindo que esta seja inicialmente definida como do tipo rígida. No entanto, a entrada em serviço e sucessiva passagem dos veículos irá provocar o fendilhamento destas camadas tratadas, passando a estrutura a comportar-se como um pavimento do tipo flexível (Costa, 2012).

O cimento também é utilizado na reciclagem de pavimentos, tal como referido anteriormente. Na realidade, a maioria dos procedimentos de reciclagem utilizam cimento como aditivo, embora haja uma série de outros aditivos que podem ser utilizados na reciclagem. O cimento é o agente estabilizador mais utilizado em todo o mundo, tanto como um agente único, como em conjunto com outros agentes, geralmente com agentes estabilizadores betuminosos. A

grande disponibilidade de cimento contribui para a sua extensa utilização. O cimento atua aumentando a rigidez inicial das misturas recicladas a frio, garantindo capacidade de suporte quando a emulsão betuminosa não teve cura suficiente para garantir a capacidade de suporte requerida aquando da abertura ao tráfego. Contudo o aumento excessivo de rigidez provocado por teores mais elevados de cimento podem reduzir as características de resistência à fadiga, além dos riscos de fendilhamento por retração. O teor de cimento deve, portanto, ser avaliado criteriosamente para assegurar o desempenho adequado (Silva, 2011).

2.4.3. Cinzas Volantes

As cinzas volantes são um material sólido obtido como resíduo a partir da queima de carvão nas centrais termoelétricas, e que recentemente são precipitadas em electrofiltros. As cinzas volantes são um pó com granulometria similar à do cimento, com uma massa volúmica seca de 0,6-0,8 g/cm³ e 0,1-0,3% de humidade natural (Gorski, 2010).

As cinzas volantes são uma pozolana artificial, ou seja, são um material sílico-aluminoso que isoladamente não possui grande poder cimentício, mas quando em presença de água, reage com a cal, formando um composto com valores cimentícios. As cinzas volantes são constituídas por partículas de sílica e alumina, e algumas vezes, contam com a presença de carbono livre. As partículas das cinzas volantes podem ter cargas elétricas, o que dificulta o processo de compactação (Castro, 2011).

A adição de cinzas volantes altera as características de compactação de solos granulares e coesivos da seguinte forma: i) devida à alteração da graduação dos materiais e ii) devido a reações químicas que ocorrem entre solo, cinzas volantes e água (Ubaldo *et al.*, 2012).

Apesar das cinzas volantes terem desempenho mais satisfatório em misturas para base de pavimentos, as cinzas de fundo são mais utilizadas, pois no processo de incineração geram-se mais cinzas de fundo do que cinzas volantes. Nos Estados Unidos seu uso está limitado a alguns trechos de teste. Entretanto, na Europa é utilizada como material para base de pavimentos ou aterros há duas décadas. Na Dinamarca, Alemanha e Holanda mais do que 50% das cinzas de fundo produzidas são utilizadas como base para pavimentos e aterros (Dourado, 2013).

2.4.4. Água

A água a empregar nas misturas tratadas com ligantes hidráulicos e betão hidráulico, para as aplicações previstas neste Caderno de Encargos, deverá ser doce, limpa e não deverá conter óleos, ácidos, matérias orgânicas ou quaisquer outros produtos prejudiciais que possam influenciar os tempos de cura e o desenvolvimento da resistência da mistura (EP, 2009).

Além das misturas tratadas com ligantes hidráulicos, na maioria dos casos também é necessário adicionar água nas misturas tratadas com emulsão betuminosa de forma a garantir a necessária trabalhabilidade dessas misturas (Wirtgen, 2012), tal como se irá verificar posteriormente.

2.4.5. Aditivos

Os aditivos são materiais finamente divididos utilizados nas misturas com o objetivo de melhorar certas propriedades ou alcançar propriedades especiais. Os estudos realizados anteriormente demonstram que os aditivos podem melhorar significativamente o desempenho das misturas a frio ou dos materiais granulares tratados a frio. São vários os aditivos utilizados na melhoria do desempenho de misturas, mas os mais comuns são o cimento, a cal hidráulica, as cinzas volantes, o betume espuma e a emulsão betuminosa (Hashemian *et al.*, 2014).

No caso mais específico dos aditivos previstos para as misturas tratadas com ligantes hidráulicos e betão hidráulico, segundo a NP EN 206-1 estes agrupam-se em:

- Fíler calcário (tipo I - adições quase inertes);
- Cinzas volantes (tipo II – adições pozolânicas ou hidráulicas latentes);
- Sílica de fumo (tipo II – adições pozolânicas ou hidráulicas latentes) (Santos, 2010).

No caso das misturas com ligantes betuminosos, produzidas a quente ou a frio, os aditivos são produtos que estimulam uma determinada característica dos betumes, em função da aplicação desejada, mantendo-se inalteradas as restantes características (Santos, 2010).

A utilização de aditivos permite modificar várias características das misturas, sem alterar a sua composição, ao melhorar a resistência ao fendilhamento (betume ou emulsão modificada com polímeros) e a adesividade (agentes de adesividade) ou ao diminuir a suscetibilidade térmica (plastificantes), entre outras características que se pretenda melhorar (Duarte, 2010).

2.5. Aditivos Utilizados para Melhoria do Desempenho do Material Granular

Apesar de existirem mais aditivos para materiais de pavimentação, como é o caso dos polímeros naturais e sintéticos, da cal, entre outros, na realização deste estudo foram usados dois aditivos, cimento e cinzas volantes, que tiveram como função melhorar o desempenho da estabilização realizada com emulsão betuminosa.

Ambos os materiais são utilizados para aumentar a resistência dos materiais estabilizados, devido à reação de cimentação que se deve verificar entre estes aditivos e a água da emulsão betuminosa. O cimento será utilizado como sendo o material de construção mais adequado para se atingir os resultados de aumento de resistência esperados. As cinzas volantes são um resíduo alternativo que se pretende estudar em alternativa ao cimento, mas que à partida possui uma menor capacidade de cimentação (não sendo ativado), pelo que será espectável a obtenção de resultados menos satisfatórios.

A cal hidráulica, como já se referiu, é também um dos aditivos mais comuns usados neste tipo de misturas. Sabe-se que a emulsão betuminosa pode ser usada em conjunto com a cal hidráulica para produzir misturas com maior resistência inicial, mais resistentes a danos provocados pela água e misturas mais rígidas (Modarres e Ayar, 2014).

As emulsões utilizadas em misturas betuminosas, nomeadamente em misturas recicladas, podem ser combinadas com aditivos para diferentes finalidades. Entre os mais comuns encontram-se os agentes rejuvenescedores e os polímeros. Os agentes rejuvenescedores são mais utilizados em processos de reciclagem a quente. Nos processos de reciclagem a frio são utilizados agentes rejuvenescedores emulsionados. Tendo em vista o rejuvenescimento do ligante envelhecido pode-se então considerar que o teor existente fará parte do teor total de ligante betuminoso da mistura reciclada, desencadeando assim uma redução no consumo de ligante adicional (Silva, 2011). Embora não seja o caso deste trabalho, é importante referir que a emulsão betuminosa também pode ter função de aditivo ao produzir outro tipo de misturas para pavimentação.

A adição de cimento em misturas para pavimentos também não é recente. Os cimentos Portland eram utilizados, inicialmente, apenas como filer em misturas a quente, com o objetivo de evitar o descolamento da interface agregado-ligante. Foram mostradas que diversas propriedades desse tipo de mistura podem ser melhoradas pela adição de cimento,

como módulo de resiliência, a suscetibilidade à variação de temperatura e à humidade, além da deformação permanente. Quando utilizado na reciclagem de pavimentos, a adição de cimento melhora as principais propriedades de misturas recicladas a frio devido à hidratação do cimento em si, ao efeito de filler e também à capacidade que tal material possui de aumentar a taxa de coesão entre a emulsão e os demais materiais constituintes da mistura após a compactação (Almeida *et al.*, 2014). Neste trabalho, em particular, também se vai utilizar cimento como aditivo nos materiais granulares tratados com emulsão de modo o procurar otimizar o desempenho dessas misturas, utilizando-se cinzas volantes como aditivo alternativo.

2.6. Ensaios Mecânicos para Avaliação do Desempenho das Misturas

Neste Subcapítulo dá-se especial atenção aos ensaios utilizados para demonstrar o desempenho das misturas realizadas neste trabalho. Refere-se a influência de cada ensaio na avaliação do desempenho das misturas, quais os fatores mais importantes na sua realização e qual o procedimento a seguir, com especial relevância às referências normativas e a trabalhos anteriores realizados com esses ensaios.

Importa referir que a seleção dos ensaios realizados durante a parte experimental deste trabalho se baseou na pesquisa bibliográfica apresentada anteriormente, de acordo com a qual se indicava que os principais problemas das misturas tratadas com emulsão eram a sensibilidade à água e a resistência à deformação, além do elevado volume de vazios destas misturas. De acordo com o procedimento de formulação destas misturas indicado pela Wirtgen (2012), também se observou que o ensaio de tração indireta é o principal ensaio utilizado para avaliação do desempenho destas misturas.

2.6.1. Ensaio de Sensibilidade à Água

As ações climáticas, representadas pelas temperaturas e pela água, desempenham um fator importante e influenciam de uma forma preponderante a sua degradação. Desta forma, a temperatura do ar, a radiação solar e a velocidade do vento à superfície do pavimento, constituem ações sobre o pavimento, alterando as propriedades mecânicas e a durabilidade dos materiais. O teor em água, proveniente do exterior ou da fundação do pavimento, interfere claramente no nível da resistência que o pavimento oferece quando solicitado pelas cargas impostas pelo tráfego. As águas que se infiltram na estrutura do pavimento devem ser

escoadas através de um sistema de drenagem. A forma mais eficaz de evitar a influência da água nos pavimentos deverá passar pela utilização de materiais com baixa sensibilidade à água e o dimensionamento do pavimento considerando o efeito do teor em água nos módulos de deformabilidade ou na resistência à tração indireta (Bispo, 2013).

A ação da água sobre as misturas pode afetar em maior ou menor grau a durabilidade dos pavimentos. O estudo da sensibilidade à água é um problema complexo, pois depende de fatores ambientais, práticas construtivas e características das misturas em si, podendo o clima e o tráfego acelerar a degradação dos pavimentos (Pereira, 2009). Posto isto, importa salientar que atualmente a resistência à ação da água é avaliada através da redução da resistência à tração indireta das misturas em estudo após condicionamento em água em condições predefinidas (ensaio de sensibilidade à água). Outro resultado que é obtido durante este ensaio é a resistência à tração indireta e a deformação de pico (dos provetes não condicionados), que pode ser utilizado para avaliar duma forma global a resistência mecânica das misturas.

2.6.2. Ensaio de Tração Indireta (aumento da resistência com o tempo de cura)

A resistência à tração indireta é um ensaio muito utilizado para avaliação do desempenho de misturas para pavimentos, pela facilidade de execução e pelas importantes informações que fornece para se conhecer o comportamento das misturas. Esse ensaio é utilizado para avaliar a durabilidade das misturas, no procedimento de sensibilidade à água, tal como se referiu anteriormente. Além disso, sendo um ensaio em que se avalia a resistência à fratura das misturas, também pode ser relacionado indiretamente com a resistência à fadiga das misturas, que é um aspeto fundamental no desempenho dos pavimentos.

O fendilhamento por fadiga é uma das principais causas de deterioração dos pavimentos, representando em muitos casos, a sua degradação inicial. O fendilhamento devido a variações térmicas surge devido às diferentes temperaturas que ocorrem nos ciclos dia/noite, levando desta forma ao endurecimento da mistura, tornando-a mais suscetível ao aparecimento de fendas (Bispo, 2013).

A resistência à fadiga das misturas é a capacidade que elas apresentam para resistir a esforços de flexão repetidos sem atingir a rotura, sendo expressa como uma relação entre a tensão ou extensão inicial e o número de repetições de carga que conduzem à ruína. Este número é habitualmente determinado usando ensaios de carregamento repetido, em flexão, tração direta

ou compressão diametral, realizados a determinado níveis de tensão ou extensão (Pais *et al.*, 2000).

Neste estudo em particular, o ensaio de tração indireta foi utilizado para avaliar a evolução do comportamento das misturas tratadas com emulsão betuminosa (aditivadas com cimento ou cinzas volantes) ao longo do tempo de cura. De facto, o processo de cura influencia a resistência deste tipo de misturas pela evaporação da água da emulsão, mas principalmente pelos processos de cimentação dos aditivos utilizados. Assim, os provetes foram submetidos a um processo de cura e só posteriormente (para diferentes tempos de cura) foi realizado o ensaio de tração indireta. A cura é o processo de perda de água, quando o betume residual da emulsão e aditivos alcançam suas propriedades. Os principais fatores que interferem nos processos de rutura e cura das emulsões são: superfície específica, carga elétrica e características químicas do agregado, química dos aditivos (cimento e cal), temperatura, humidade relativa, características do agente emulsificante, viscosidade do betume, ou ainda fatores de aplicação. O processo pode levar meses para ser finalizado (Silva, 2011).

2.6.3. Ensaio de Compressão Uniaxial

Para caraterizar a resistência à deformação permanente de misturas têm sido desenvolvidos diversos ensaios laboratoriais. As novas normas europeias incluem, com este objetivo, os Ensaio de Pista e os Ensaio de Compressão Uniaxial Cíclico e Triaxial Cíclico. No entanto, para a implementação prática dos ensaios referidos nas normas europeias é necessário ultrapassar alguns obstáculos como a definição com precisão dos procedimentos e condições de ensaio e definir valores limites de aceitação para os resultados. Acresce o facto de não ser interessante integrar no mercado ensaios diferentes cujo objetivo é único. Deste modo, torna-se importante comparar os ensaios e os seus resultados tendo em vista fatores como a sua facilidade de realização, aquisição de equipamento e adequação à prática corrente no país (Pais *et al.*, 2008).

O ensaio de compressão uniaxial estático tem vindo a ser adotado e implementado em todo o mundo, dada a sua simplicidade na preparação dos provetes e facilidade de execução, através da utilização de equipamento de ensaio pouco complexos e de baixo custo. Os provetes habitualmente de forma cilíndrica, são submetidos a uma carga e temperatura constantes durante um determinado intervalo de tempo, gerando um estado de compressão simples. Embora este ensaio não seja o mais adequado para a simulação laboratorial dos efeitos da

densificação e das deformações provocadas pelo tráfego, permite avaliar as várias propriedades das misturas betuminosas. Os ensaios de compressão uniaxial com aplicação de cargas repetidas são mais adequados do que os estáticos, do ponto de vista da avaliação das deformações permanentes. Este tipo de ensaios consiste na aplicação repetida de ciclos de carga e de descarga sobre o provete, medindo-se as extensões verticais resultantes. Tendo em vista a definição das condições de ensaio, para além do valor da carga máxima a aplicar ao provete e da temperatura de ensaio, há ainda que fixar a forma de variação do carregamento, o tempo de carga e o tempo de repouso entre as sucessivas aplicações de carga, para simular a passagem dos veículos, bem como a tensão aplicada ao longo do tempo (Bispo, 2013).

O equipamento utilizado no ensaio de compressão uniaxial é constituído por um sistema de aplicação de cargas, com funcionamento hidráulico ou pneumático, uma célula de carga que mede o valor da força aplicada numa das geratrizes do provete cilíndrico, e transdutores do tipo LVDT localizados perpendicularmente ao plano de carga e colocados de forma diametralmente oposta, que permitem medir as deformações do provete segundo o eixo diametral horizontal ou vertical, função da grandeza a determinar. Antes de iniciar o ensaio, deve ser realizado um período de condicionamento de 10 ciclos para ajustar o equipamento ao provete. O ensaio deve ser realizado para dois diâmetros do provete perpendiculares, entre si (Mendes, 2011).

3. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

3.1. Introdução

O presente capítulo tem como principal função definir os materiais e os métodos de ensaio utilizados ao longo do trabalho desenvolvido no decorrer desta dissertação, assim como os procedimentos necessários para a produção dos materiais granulares tratados com emulsão betuminosa.

Nesse sentido, o Subcapítulo 3.2 enuncia os materiais utilizados ao longo de todo o trabalho laboratorial, onde se menciona a proveniência desses materiais, incluindo os aditivos em estudo, e as principais características de todos os materiais utilizados na produção dos materiais granulares estabilizados com emulsão betuminosa.

Em seguida descreve-se toda a metodologia de estudo efetuada ao longo do trabalho e encontra-se dividida em dois subcapítulos. No Subcapítulo 3.3 descreve-se a metodologia de produção em que é enunciado todo o procedimento de produção das misturas utilizando cimento e cinzas volantes em materiais granulares estabilizados com emulsão betuminosa.

Finalmente, no Subcapítulo 3.4 é feita a descrição da metodologia de caracterização do desempenho das misturas em estudo, onde são enunciados todos os ensaios utilizados ao longo de toda a dissertação bem como a sua descrição.

3.2. Materiais

Durante esta dissertação foram utilizados diferentes tipos de materiais, nomeadamente: agregado britado de granulometria extensa (ABGE) ou *tout-venant*, emulsão betuminosa, água, e aditivos (cimento e cinzas volantes) que contribuíram para que fosse possível produzir as misturas realizadas. Seguidamente será apresentada uma breve descrição das características desses materiais e do motivo pelo qual foram escolhidos.

3.2.1. Agregado Britado de Granulometria Extensa

O objetivo principal deste trabalho é estudar de que forma se pode otimizar o desempenho dum material granular habitualmente utilizado em camadas de sub-base ou base de pavimentos rodoviários, tratando esse material com emulsão (esta mistura é denominada no

caderno de encargos da EP (2009) como ABGETE) e com aditivos hidráulicos (cimento ou cinzas volantes). Assim, o material a utilizar como suporte para todo o estudo é um agregado britado de granulometria extensa (ABGE), fornecido pela empresa Bezerras, e que costuma ser utilizado nas funções anteriormente referidas. O ABGE fornecido (Figura 3.1) é de origem granítica que possui na sua constituição 30% de quartzo, 45% de feldespato e 25% de Biotite.



Figura 3.1 - Agregado britado de granulometria extensa utilizado nas misturas

O ABGE possui uma dimensão do tipo 0/32 e, de acordo com a norma EN 13043 e EN 933-2 tem uma granulometria G_{A85} . Desta forma, este material não cumpre de forma integral as características indicadas no caderno de encargos da EP (2009) para os agregados a utilizar num material do tipo ABGETE, que devem ser do tipo G_{A90} , tal como se pode observar na Figura 3.2.

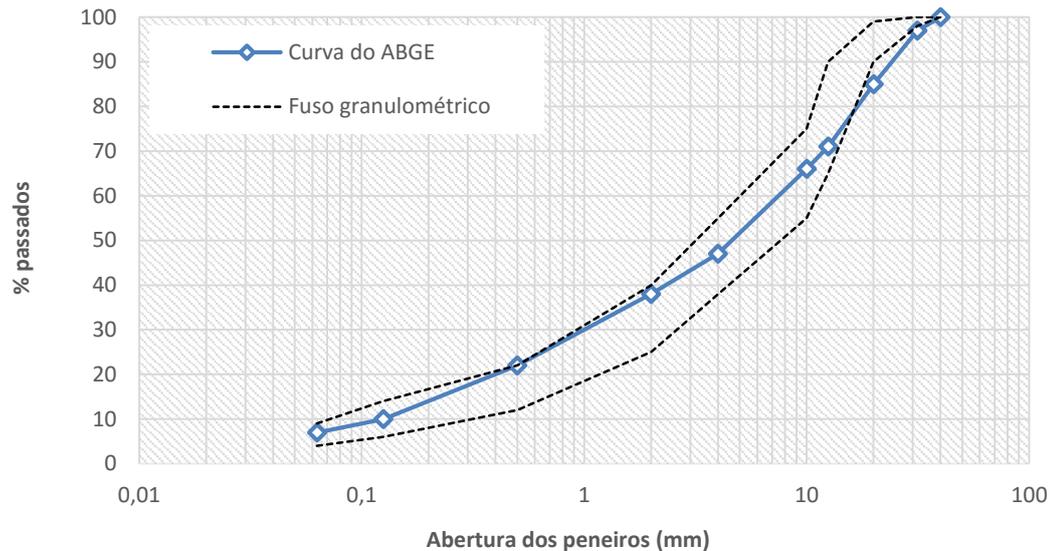


Figura 3.2 – Granulometria do ABGE utilizado neste estudo e fuso indicado para o material ABGETE no CE da EP (2009)

Assim, para garantir que o material em estudo era do tipo do tipo G_{A90} (mais de 90% passados no peneiro 20 mm) importa salientar que o ABGE utilizado para produção das várias misturas foi peneirado através de um peneiro de 25 mm, garantindo-se ainda dessa forma que os agregados de maior dimensão não vão influenciar tanto os resultados obtidos durante os ensaios de desempenho. De facto, dado que os vários provetes para ensaio foram compactados no compactador Marshall, não era adequado que esses provetes tivessem agregados de dimensão superior a 25 mm.

Por último, de referir que o ABGE tem uma absorção de água (EN 1097-6) maior que 1% WA_{24} , o que ainda cumpre as especificações do CE da EP (2009) mas obriga a utilizar uma maior quantidade de emulsão ou água para tratamento do ABGE de forma a garantir uma trabalhabilidade adequada.

3.2.2. Emulsão Betuminosa

A emulsão betuminosa utilizada para produção dos materiais granulares tratados com emulsão é proveniente da empresa Cepsa Portuguesa Petróleos, S.A., e é identificada por esta empresa como sendo uma emulsão ECL-2 (Figura 3.3) ou C60B5 de acordo com a norma europeia EN 13808. De acordo com o caderno de encargos da Estradas de Portugal (EP, 2009) este tipo de emulsão catiónica é a mais adequada para utilização em bases granulares tratadas com emulsão, o que justifica a sua seleção no âmbito deste trabalho.

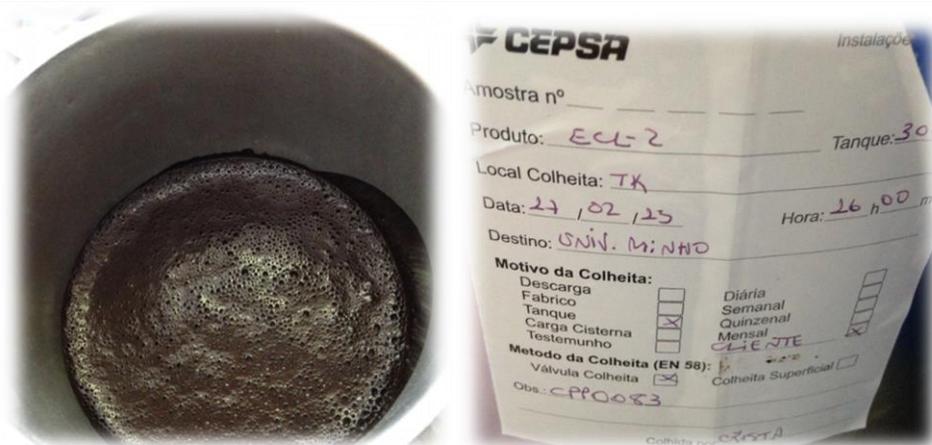


Figura 3.3 - Emulsão betuminosa utilizada nas misturas realizadas e respetivo rótulo

De acordo com a declaração de desempenho da empresa que forneceu para esta emulsão betuminosa, o índice de rotura (EN 13075-1) é superior a 170 (o que significa que esta emulsão é de rotura lenta). Em relação à viscosidade da emulsão, esta é avaliada pelo tempo necessário para um escoamento de 2 mm a 40 °C (EN 12846-1), que nesta emulsão varia entre 15 e 70 s. O teor de ligante (EN 1428) desta emulsão varia entre 58% e 62% e, por fim, o seu resíduo após peneiração no peneiro de 0,5 mm é inferior ou igual a 0,1%.

A emulsão betuminosa é composta por betume emulsionado com água e, ao longo da preparação das várias misturas de material granular tratado com emulsão, a emulsão tem como função a ligação entre todos os materiais granulares da mistura, dando uma coesão à mistura que esta não tinha antes do tratamento com emulsão.

3.2.3. Água

De acordo com o procedimento de produção de misturas tratadas com emulsão (ABGETE) indicado no manual da Wirtgen (2012), para se garantir uma boa trabalhabilidade que permita conferir à mistura a sua máxima compacidade é necessário adicionar à mistura alguma água, além da existente na emulsão e da humidade higroscópica do ABGE de 4,68% (valor determinado na fase de produção das misturas), que neste método de produção a frio é utilizado no seu estado húmido. A água utilizada foi obtida da rede de distribuição de água da Universidade do Minho.

3.2.4. Aditivos

No que diz respeito aos aditivos foram usados dois tipos de aditivos: cimento e cinzas volantes. Os aditivos utilizados são apresentados na Figura 3.4 (do lado esquerdo da imagem encontra-se o cimento e do lado direito as cinzas volantes). O cimento foi selecionado por ser o principal aditivo para melhoria das misturas tratadas com emulsão, e as cinzas volantes foram avaliadas como alternativa ao cimento.

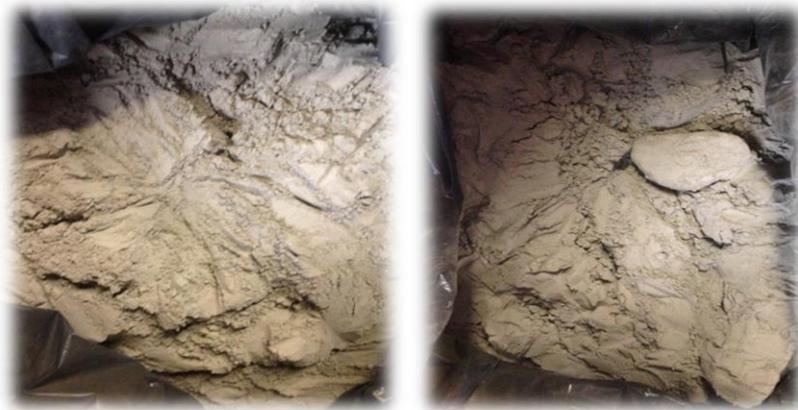


Figura 3.4 - Aditivos utilizados na produção das misturas: cimento (esquerda) e cinzas volantes (direita)

Assim, pode verificar-se que o aspeto de ambos os materiais é muito semelhante, sendo ambos materiais extremamente finos. Nesse sentido, e para se conseguir realizar uma comparação direta entre os dois aditivos, estes foram utilizados na produção das misturas betuminosas com as mesmas percentagens (fixando-se para isso três percentagens de aditivos de 0,5%, 2,0% e 3,5%), para uma percentagem ótima de emulsão betuminosa fixa (determinada numa fase inicial através dum processo de formulação baseado no manual da Wirtgen (2012) para uma percentagem de cimento de 2,0%).

De referir ainda que o cimento utilizado neste estudo foi um cimento do tipo Portland de calcário CEM II/B-L 32,5N, que de acordo com o fornecedor é o mais adequado para trabalhos de pavimentação. De facto, sendo um cimento que origina materiais de menor resistência, que não é necessária nesta situação, consegue garantir melhor trabalhabilidade e menos problemas de retração. As cinzas volantes são um resíduo fornecido por uma central termoelétrica, e foram utilizadas diretamente nas misturas sem nenhum tipo de ativação prévia.

3.3. Metodologia Laboratorial de Produção

No decorrer deste subcapítulo será explicado todo o processo de realização das misturas onde serão expostas as quantidades utilizadas de cada material, os métodos usados e todos os materiais empregados para a produção de todas as misturas.

3.3.1. Produção de Misturas para Formulação ou Determinação do Teor Ótimo de Emulsão

Inicialmente, no que diz respeito à metodologia de produção, começou-se por definir o teor ótimo de emulsão que será utilizado posteriormente ao longo do trabalho. Assim, com base no manual da Wirtgen (2012), foram escolhidas três percentagens de emulsão betuminosa para este estudo de formulação, fixando neste estudo inicial a percentagem de cimento em 2% (não se utilizando cinzas volantes nesta fase). Embora o manual anteriormente referido indique um valor de 1% como um valor mais usual para a quantidade de aditivo a utilizar nestas misturas, optou-se por utilizar um valor de referência mais alto tendo em consideração o objetivo de melhorar o desempenho das misturas ABGETE neste trabalho.

A utilização de três percentagens de emulsão betuminosa baseou-se nas indicações do manual da Wirtgen (2012), estimando-se a adição ideal de emulsão com base nas diretrizes desse mesmo manual, que refere que esse valor deverá situar-se entre 4,0% e 4,7% (optando-se neste caso pelo valor de 4,5%) ao estudar misturas ABGETE produzidas com um material britado em que haja 7 a 10% de material passado no peneiro 0,075 mm e cerca de 50% de material passado no peneiro 4,75 mm. Dado que o teor em betume residual da emulsão é de 60%, isso significa que o teor em betume alvo do material tratado com emulsão será 2,7%. Além deste teor intermédio em emulsão betuminosa utilizado na formulação, estudaram-se mais dois teores com uma variação de 0,5% para cima e para baixo deste valor, ou seja, 4,0% (teor em betume residual de 2,4%) e 5,0% (teor em betume residual de 3,0%). A Tabela 3.1 apresenta as três misturas ABGETE realizadas nesta fase do estudo de formulação, para determinação do teor ótimo em emulsão, bem como a designação de cada mistura.

Tabela 3.1 - Designação das misturas realizadas no estudo de formulação

Designação da Mistura	Tipo de Aditivo	Percentagem de Aditivo	Tipo de Agregado	Tipo de Emulsão	Percentagem de Emulsão
E4,0_C2	Cimento	2%	Agregado Britado de Granulometria Extensa (ABGE)	ECL - 2	4,0%
E4,5_C2			4,5%		

E5,0_C2

5,0%

No seguimento de todo o processo descrito anteriormente, torna-se primordial fazer uma descrição mais pormenorizada de todos os elementos e percentagens envolvidos no procedimento de produção destas misturas ABGETE, tendo em consideração que é necessário produzir seis provetes para cada mistura a estudar (visto que o estudo de formulação destas misturas é efetuado através de um ensaio de sensibilidade à água, de acordo com as indicações do manual da Wirtgen (2012)).

Para a realização de cada mistura enunciada, começa-se por pesar 10000 g de ABGE (que se encontra com o seu estado de humidade natural). Tendo em consideração o teor em humidade higroscópica do ABGE anteriormente referido (4,68%), determina-se a massa seca dos agregados do ABGE, a partir da qual são determinadas as restantes massas de material a introduzir. Em seguida determina-se a massa de cimento (2%) a introduzir na mistura e o peso de emulsão a introduzir em cada uma das misturas correspondentes a 4,0%, 4,5% e 5,0% de emulsão betuminosa. Finalmente determina-se a quantidade adicional de água a introduzir para garantir uma boa trabalhabilidade do material nas fases de mistura e compactação. Essa quantidade de água a adicionar deve ser tal que, em conjunto com o teor em água higroscópico e o teor em água da emulsão betuminosa, permita atingir o teor em água ótimo de Proctor do ABGE (7,0%, de acordo com um trabalho anterior de Pereira (2014)). Em resumo, as quantidades determinadas através destes cálculos são apresentadas na Tabela 3.2).

Tabela 3.2 - Materiais utilizados nas misturas efetuadas para determinação do teor ótimo de emulsão

Materiais	Massa de cada material (g) utilizado na formulação da mistura		
	4,0% Emulsão Betuminosa	4,5% Emulsão Betuminosa	5,0% Emulsão Betuminosa
	+ 2% de Cimento	+ 2% de Cimento	+ 2% de Cimento
ABGE	10000,0	10000,0	10000,0
ABGE _{SECO}	9532,0	9532,0	9532,0
Cimento	191,1	191,1	191,1
Emulsão Betuminosa	382,1	429,9	477,6
Água	68,3	49,2	30,1

Para cada mistura a estudar, juntaram-se todos os materiais na misturadora (primeiro o ABGE, depois o cimento, em seguida a emulsão betuminosa e por fim a água adicional) e

procedeu-se à amassadura destes materiais durante 4 minutos para que a mistura ABGETE fique bem envolvida, tal como se mostra na Figura 3.5.



Figura 3.5 - Fase de produção das misturas ABGETE

No seguimento deste processo, torna-se essencial proceder à realização dos provetes. Para tal, é necessário pesar cerca de 1200 g de mistura para cada provete e, consecutivamente, proceder à compactação dessa quantidade de mistura tratada com emulsão no compactador Marshall, como mostra na Figura 3.6.

Depois de repetir este processo seis vezes para cada mistura, está concluída a fase de produção dos provetes, que em seguida devem ser desmoldados e submetidos a um processo de cura (1 dia em estufa a 40 °C, como será descrito mais em pormenor mais à frente) antes de serem ensaiados. O aspeto final dos provetes pode ser observado na Figura 3.7.



Figura 3.6 - Compactador utilizado na realização dos provetes



Figura 3.7 – Aspeto final de alguns provetes produzidos com ABGE tratado com emulsão

Depois de todo o procedimento de execução das misturas ABGETE para a determinação do teor ótimo de emulsão, é necessário proceder a uma análise do seu desempenho (através da análise da resistência à tração indireta e da sensibilidade à água) que fará com que essa percentagem seja definida, o que será explicado posteriormente no Subcapítulo 3.4.1. Mais tarde, no Capítulo 4, a análise dos resultados irá demonstrar que o teor ótimo em emulsão betuminosa deve ser fixada em 4,25%, valor esse utilizado para produção das próximas misturas.

3.3.2. Produção de Misturas para Avaliação da Influência dos Aditivos

Após formulação das misturas ABGETE, onde se procedeu à determinação do teor ótimo de emulsão, foram realizadas novas misturas utilizando o mesmo procedimento descrito para a determinação do teor ótimo de emulsão, só que desta vez fixando a percentagem de emulsão em 4,25% e fazendo variar a percentagem (três valores a variar 1,5% em torno do valor intermédio de 2,0%, ou seja, 0,5%, 2,0% e 3,5%) e o tipo de aditivos (cimento e cinzas volantes), como é descrito na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Designação das misturas realizadas para avaliar o efeito dos aditivos

Designação da Mistura	Tipo de Aditivo	Percentagem de Aditivo	Tipo de Agregado	Tipo de Emulsão	Percentagem de Emulsão
C_0,5	Cimento	0,5%	Agregado Britado de Granulometria Extensa (ABGE)	ECL - 2	4,25%
C_2,0		2,0%			
C_3,5		3,5%			
CV_0,5	Cinzas Volantes	0,5%			
CV_2,0		2,0%			
CV_3,5		3,5%			

Na Tabela 3.3 também se apresenta a designação dada a cada uma das seis misturas tratadas com emulsão (ABGETE) produzidas nesta fase do estudo, três para cada um dos aditivos em análise, onde se fez variar a percentagem de aditivo tendo em consideração o manual da Wirtgen (2012), mas mantendo-se valores iguais para o cimento e para as cinzas volantes para efeito de comparação.

Em seguida procedeu-se ao cálculo das quantidades de cada um dos materiais a utilizar nas misturas com cimento (Tabela 3.4) e com cinzas volantes (Tabela 3.5), de forma idêntica à descrita anteriormente aquando da formulação das misturas ABGETE.

Tabela 3.4 - Materiais utilizados nas misturas efetuadas com diferentes percentagens de cimento

Materiais	Massa de cada material (g) utilizado nas misturas com cimento		
	4,25% Emulsão + 0,5% de Cimento	4,25% Emulsão + 2,0% de Cimento	4,25% Emulsão + 3,5% de Cimento
ABGE	10000,0	10000,0	10000,0
ABGE _{SECO}	9532,0	9532,0	9532,0
Cimento	47,8	191,1	334,3
Emulsão Betuminosa	406,0	406,0	406,0
Água	58,8	58,8	58,8

Tabela 3.5 - Materiais utilizados nas misturas efetuadas com diferentes percentagens de cinzas volantes

Materiais	Massa de cada material (g) utilizado nas misturas com cimento		
	4,25% Emulsão + 0,5% de Cinzas Volantes	4,25% Emulsão + 2,0% de Cinzas Volantes	4,25% Emulsão + 3,5% de Cinzas Volantes
ABGE	10000,0	10000,0	10000,0
ABGE _{SECO}	9532,0	9532,0	9532,0
Cinzas volantes	47,8	191,1	334,3
Emulsão Betuminosa	406,0	406,0	406,0
Água	58,8	58,8	58,8

Deve ter-se em atenção que todos os cálculos foram realizados com base no mesmo princípio, onde foram calculadas as quantidades a utilizar segundo o procedimento descrito pela Wirtgen (2012).

Procedeu-se em seguida à produção das várias misturas com base nos procedimentos já descritos. Na Figura 3.8 é visível o aspeto homogéneo e a textura (bem diferente das misturas

betuminosas a quente, e mais próximo dum material granular não tratado) que é conferido à mistura granular estabilizada com emulsão betuminosa e onde há a adição de aditivos.



Figura 3.8 - Textura conferida à mistura ABGETE aquando da sua produção

Tal como se referiu anteriormente, após execução das misturas ABGETE para a determinação do efeito dos aditivos nestas misturas, é necessário proceder a uma análise do seu desempenho (através da análise da resistência à tração indireta e sensibilidade à água, da evolução da resistência à tração indireta com o tempo de cura e da resistência à deformação medida num ensaio de compressão uniaxial cíclico), o que será explicado posteriormente nos Subcapítulos 3.4.1, 3.4.2 e 3.4.3.

Foram realizados então, um total de oitenta e seis provetes para se proceder à realização dos três ensaios descritos no Subcapítulo 3.4. No ensaio de sensibilidade à água foram utilizados 36 provetes (6 por mistura), no ensaio de tração indireta a diferentes tempos de cura usaram-se 30 provetes (5 por mistura) e no ensaio de resistência à compressão uniaxial foram utilizados mais 20 provetes (aproximadamente 3 provetes por mistura).

3.4. Metodologia Laboratorial de Caraterização do Desempenho

Após a preparação de todos os provetes torna-se fundamental proceder à realização de ensaios sobre os provetes para analisar as características de desempenho das misturas produzidas. De forma a estudar as principais características destas misturas, referidas no estado da arte, optou-se por realizar três procedimentos de ensaio que serão explicitados nos Subcapítulos seguintes (onde se faz uma descrição mais concreta de cada ensaio, respetivo procedimento e motivos para seleção desse ensaio no âmbito deste trabalho). Uma das razões para seleção de

alguns ensaios relaciona-se a intenção de ensaiar apenas provetes compactados no compactador Marshall, de forma a facilitar a aplicação destes procedimentos num maior número de laboratórios.

3.4.1. Avaliação da Sensibilidade à Água e Resistência à Tração Indireta

O ensaio de sensibilidade à água pretende avaliar a resistência das misturas ABGETE realizadas às ações ambientais, e mais especificamente à ação da água e de variações térmicas, comparando a resistência de provetes submetidos a essas ações em relação a provetes não condicionados. O ensaio de sensibilidade à água foi utilizado inicialmente para formulação da mistura tratada com emulsão, ou seja, para determinação do teor ótimo em emulsão. Nessa fase foram ensaiados 18 provetes (6 por cada teor em emulsão estudado). Posteriormente, aquando do estudo do efeito dos aditivos, foi necessário realizar mais 36 provetes para este ensaio, como foi referido anteriormente (ou seja, 6 provetes por cada mistura, sendo que foram realizadas 6 misturas nessa fase).

Para cada mistura ABGETE a estudar, e de acordo com o procedimento mais específico para este tipo de misturas indicado no manual da Wirtgen (2012), que difere um pouco do procedimento da norma EN 12697-12, são necessários seis provetes cilíndricos, que após a respetiva caracterização volumétrica (determinação da baridade aparente e medição da altura dos provetes) são divididos em dois grupos. Os dois grupos de 3 provetes são caracterizados através de uma análise prévia que tem em conta a baridade aparente média e a altura média dos provetes, que deve ser semelhante.

Posteriormente à formação dos grupos, um grupo de provetes é mantido à temperatura ambiente enquanto o outro grupo é mantido imerso em água a 25 °C durante 24 horas, tal como mostra a Figura 3.9. Pelo menos duas horas antes da realização do ensaio, o grupo de provetes mantidos a seco são condicionados a seco à temperatura de 25 °C, para serem ensaiados à mesma temperatura dos provetes imersos em água.

Após todo o processo descrito, os provetes são ensaiados à tração indireta (EN 12697-23), como é demonstrado na Figura 3.10, avaliando-se também a deformação dos provetes e o tipo de rotura observado em cada provete ensaiado.



Figura 3.9 - Provetes imersos em água a 25 °C para o ensaio de sensibilidade à água

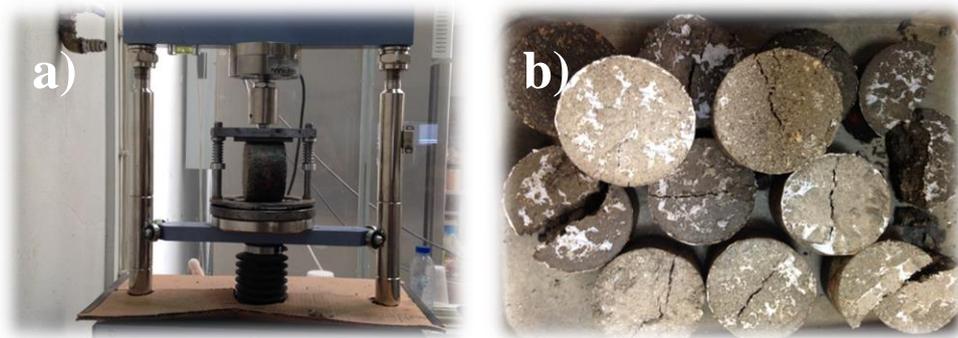


Figura 3.10 - Fases do método de ensaio para determinação da sensibilidade à água das misturas ABGETE: a) Ensaio de tração indireta; b) Deformações provocadas nos provetes

Os resultados provenientes do ensaio de tração indireta são a resistência à tração indireta dos provetes molhados (ITS_w) e a resistência à tração indireta dos provetes secos (ITS_d), ambos medidos à temperatura de 25 °C. A deformação dos provetes aquando da rotura também é outro dos valores obtido no ensaio e que pode dar indicações sobre o comportamento das misturas em estudo. No entanto, o principal resultado obtido neste ensaio, no que diz respeito à sensibilidade à água, é o rácio da resistência à tração indireta entre os provetes molhados e os provetes secos (ITSR), que dá a indicação da durabilidade das misturas em análise, o que significa que quanto maior é o ITSR, menor será a sensibilidade à água da mistura ABGETE em causa.

3.4.2. Evolução da Resistência à Tração Indireta com o Tempo de Cura das Misturas ABGETE

O ensaio de resistência à tração indireta é o principal ensaio indicado no manual da Wirtgen (2012) para determinação da resistência mecânica das misturas realizadas. Por esse motivo, depois de esse ensaio ser utilizado para determinar a sensibilidade à água das misturas

ABGETE em estudo, também foi utilizado para determinar a evolução da resistência com o aumento do tempo de cura.

De facto, quer as emulsões, quer os aditivos (cimento e cinzas volantes), permitem que as misturas tratadas aumentem a resistência ao longo do tempo conforme vai aumentando o tempo de cura. Nesse sentido, considerou-se fundamental estudar o efeito que o tempo de cura pode ter no aumento da resistência para cada aditivo em estudo, e para as diferentes percentagens em que estes foram utilizados. No entanto, este ensaio não foi realizado durante a fase inicial de formulação da mistura (ou seja, para diferentes quantidades de emulsão betuminosa), por se considerar que o processo de cura da emulsão iria ter um efeito reduzido em comparação com o efeito de cimentação dos aditivos.

Para a concretização deste método de ensaio começou-se por realizar, na mesma linha dos restantes ensaios, um conjunto de 30 provetes (5 provetes por cada mistura) para cada uma das 6 misturas em estudo (0,5%, 2,0% e 3,5% de cimento e de cinzas volantes, respetivamente), e sujeitaram-se os cinco provetes a tempos de cura crescentes antes de se realizar o ensaio de tração indireta. Inicialmente, todos os provetes foram colocados 24 horas na estufa (Figura 3.11) a 40 °C. Seguidamente, foram colocados à temperatura ambiente por diferentes períodos (tempos de cura), para que fosse possível verificar a variação do ITS, da deformação de pico e da baridade aparente em função dos tempos de cura a que foram sujeitos.



Figura 3.11 - Estufa utilizada para colocar os provetes a 40 °C

Definiu-se como tempos de cura os períodos mais habituais neste tipo de ensaios. Assim, depois das 24 horas iniciais de cura (que não foram contabilizadas na análise), fixou-se então o tempo de cura dos provetes à temperatura ambiente ao fim de 0 dias, 2 dias, 7 dias, 14 dias e 28 dias. Consequentemente, foi realizada uma planificação para que todos os tempos fossem cumpridos como havia sido planeado.

Depois dos provetes terem sido colocados à temperatura ambiente ao longo dos 28 dias, foi necessário terminar o processo de cura de cada provete pelo menos 2 horas antes do mesmo ser ensaiado. Nessa altura, o provete foi colocado numa estufa a 25 °C para que todos os ensaios fossem realizados à mesma temperatura de referência indicada pela Wirtgen (2012). Cumprido todo este procedimento, os provetes foram ensaiados à tração indireta de acordo com a norma EN 12697-23 (Figura 3.12). Dado que se estudaram misturas ABGETE com várias percentagens de aditivo e com diferentes tempos de cura, verificou-se que foram obtidos variados tipo de fissuras ilustradas na Figura 3.13.

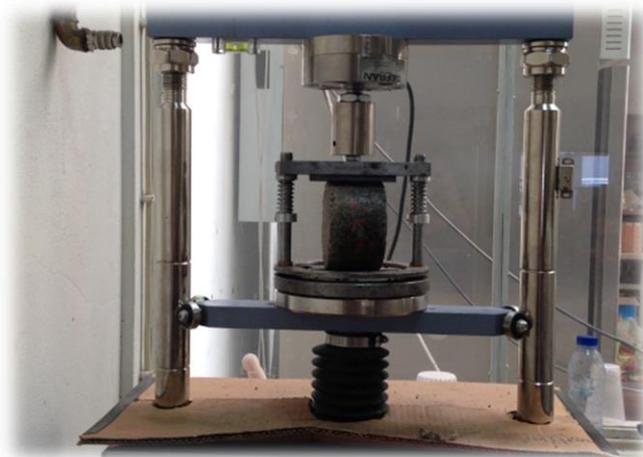


Figura 3.12 - Execução do ensaio de tração indireta



Figura 3.13 - Diferentes tipos de fissuras obtidas no ensaio de tração indireta para vários tempos de cura

3.4.3. Resistência à Deformação pelo Ensaio de Compressão Uniaxial Cíclica

O ensaio de resistência à compressão uniaxial cíclica tem por objetivo a determinação da resistência à deformação permanente em provetes cilíndricos produzidos com as misturas em estudo, e foi realizado com o equipamento de ensaio ilustrado na Figura 3.14. Este equipamento tem um sistema de controlo e aquisição bem mais avançado do que o utilizado no ensaio de tração indireta, de forma a garantir a aplicação de cargas cíclicas e medição da evolução das deformações correspondentes. Através deste ensaio também é possível determinar a taxa de deformação permanente de cada provete.



Figura 3.14 - Equipamento utilizado para realizar o ensaio de resistência à compressão uniaxial cíclica

Segundo a norma de ensaio deste ensaio (EN 12697-25), durante o ensaio é medida a variação da altura do provete ao fim de certos números especificados de aplicações de carga cíclica. Durante o ensaio, o valor máximo da tensão axial de compressão aplicada de forma cíclica à amostra mantém-se constante, medindo-se a evolução correspondente da deformação axial cíclica e permanente.

Nesta fase do estudo foram realizados um total de 21 ensaios. Inicialmente, foi efetuado o ensaio a um provete de mistura betuminosa convencional (AC 14 Surf) já existente, que foi usado como termo de comparação em relação às misturas ABGETE estudadas neste trabalho. Na sequência desse ensaio, foram realizados ensaios aos vários provetes preparados com as diversas misturas ABGETE em estudo (com diferentes percentagens de aditivo), nomeadamente 4 provetes com 0,5% de cimento, 2 provetes com 2,0% de cimento e 2 provetes com 2,5% de cimento, 4 provetes com 0,5% de cinzas volantes, 4 provetes com 2,0% de cinzas volantes e 4 provetes com 3,5% de cinzas volantes.

Inicialmente, e de acordo com a norma, pensou-se ensaiar apenas dois provetes de cada mistura com uma placa de aplicação da carga de 98,5 mm, o que à partida seria suficiente para obter uma conclusão ao nível da resistência à deformação. Já no decorrer dos ensaios, optou-se por realizar mais dois ensaios com uma placa de aplicação da carga de 70 mm para se

verificar se haveria eventualmente uma diferença significativa na deformação permanente ao aplicar as cargas numa área mais reduzida (com maior confinamento lateral do provete), sendo assim possível uma comparação entre a deformação permanente medida com cada uma das placas de aplicação da carga. No entanto, não foi possível realizar estes novos ensaios em todas as misturas por falta de provetes.

O ensaio foi realizado a 50 °C, por ser uma temperatura à qual habitualmente são realizados ensaios de deformação permanente em misturas betuminosas. A norma EN 12697-25 indica uma temperatura de ensaio de 40 °C, mas permite a utilização de outras temperaturas de ensaio. Aumentou-se a temperatura de ensaio porque nas experiências iniciais constatou-se que estava a ocorrer pouca deformação, mesmo em ensaios realizados a 50 °C. Na norma é salientado o facto de a temperatura ter de ser mantida constante ao longo de todo o ensaio em ± 1 °C.

O ensaio deve ser feito posicionando adequadamente o provete entre duas placas (a placa superior com cada um dos diâmetros acima referidos), e os dois transdutores do deslocamento (LVDTs) pousaram-se sobre o provete, em lados diametralmente opostos (Figura 3.14). Posteriormente, é necessário calibrar os LVDTs e aplicar uma pré-carga durante 10 minutos com o valor da carga cíclica máxima a aplicar em cada caso (no caso dos provetes de 98,5 mm é aplicada uma carga de 724 N e no caso do provete de 70 mm é aplicada uma carga de 366 N). Imediatamente depois de aplicada a pré-carga, aplicou-se a carga periódica, a uma frequência de 0,5 Hz e durante 3600 ciclos. Ao longo dos ensaios faz-se as leituras da variação da deformação axial permanente, registando-se também a variação cíclica da carga e da deformação.

Depois de todo o ensaio realizado, é necessário analisar todos os dados saídos da máquina e proceder aos cálculos necessários. Nessa análise, torna-se primordial proceder ao cálculo da deformação permanente e da taxa de deformação das várias misturas em estudo.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. Introdução

O capítulo de Análise de Resultados tem um papel fundamental neste trabalho uma vez que visa a expor, analisar e relacionar todos os resultados obtidos em laboratório através dos diferentes ensaios de caracterização realizados ao longo de todo o trabalho desenvolvido. A análise de resultados realizada permite determinar e avaliar as características das misturas realizadas com diferentes percentagens e tipos de aditivos bem como o desempenho das misturas ABGETE realizadas. Para além disso, é realizada uma comparação das propriedades obtidas nas misturas realizadas com as propriedades encontradas nas referências bibliográficas.

No Subcapítulo 4.2 são expressos os valores obtidos na formulação das misturas ABGETE e obtém-se uma conclusão sobre o teor ótimo de emulsão a usar posteriormente.

Nos Subcapítulos 4.3, 4.4 e 4.5 são expressos os resultados obtidos ao longo dos ensaios realizados para as misturas produzidas com diferentes tipos e percentagens de aditivos, qualificando-se os valores obtidos para caracterização de todas os parâmetros de desempenho em análise.

4.2. Determinação do Teor Ótimo de Emulsão das Misturas Tratadas

Os resultados dos ensaios de sensibilidade à água (e dos ensaios de tração indireta aos provetes secos correspondentes) realizados para formulação das misturas ABGETE são apresentados em seguida, respetivamente para as misturas com 4,0% (Tabela 4.1), 4,5% (Tabela 4.2) e 5,0% (Tabela 4.3) de emulsão betuminosa.

Tabela 4.1 - Resultados obtidos na mistura realizada com 4,0% de emulsão betuminosa e 2% de cimento

Ensaio	Provete	Deformação de Pico (mm)	ITS (kPa)	ITS médio (kPa)	ITSR (%)	Volume de Vazios (%)	Volume de Vazios (%)
ITS _w	E4_1	2,64	358	342	68%	12,7	12,0
	E4_2	3,21	382			9,7	
	E4_3	2,65	285			13,3	
ITS _d	E4_4	2,72	479	500	11,1	12,2	
	E4_5	2,75	549		12,2		

E4_6	2,84	470	12,9
------	------	-----	------

Tabela 4.2 - Resultados obtidos na mistura realizada com 4,5% de emulsão betuminosa e 2% de cimento

Ensaio	Provete	Deformação de Pico (mm)	ITS (kPa)	ITS médio (kPa)	ITSR (%)	Volume de Vazios (%)	Volume de Vazios (%)
ITS _w	E4,5_1	3,20	373	367	70	14,0	12,6
	E4,5_2	2,82	328			12,4	
	E4,5_3	2,83	400			12,7	
ITS _d	E4,5_4	2,84	503	528		11,7	
	E4,5_5	2,79	507			12,9	
	E4,5_6	2,72	572			12,1	

Tabela 4.3 – Resultados obtidos na mistura realizada com 5,0% de emulsão betuminosa e 2% de cimento

Ensaio	Provete	Deformação de Pico (mm)	ITS (kPa)	ITS médio (kPa)	ITSR (%)	Volume de Vazios (%)	Volume de Vazios (%)
ITS _w	E5_1	3,03	429	427	74	12,0	11,8
	E5_2	2,65	422			10,3	
	E5_3	2,91	429			10,9	
ITS _d	E5_4	3,25	599	579		13,1	
	E5_5	2,91	540			12,2	
	E5_6	6,34	598			12,2	

Para a determinação do teor ótimo de emulsão, optou-se por apresentar os resultados anteriores de forma gráfica. Inicialmente avaliou-se a influência da percentagem de emulsão nos resultados do ensaio de tração indireta dos provetes secos: ITS e de deformação na rotura (Figura 4.1).

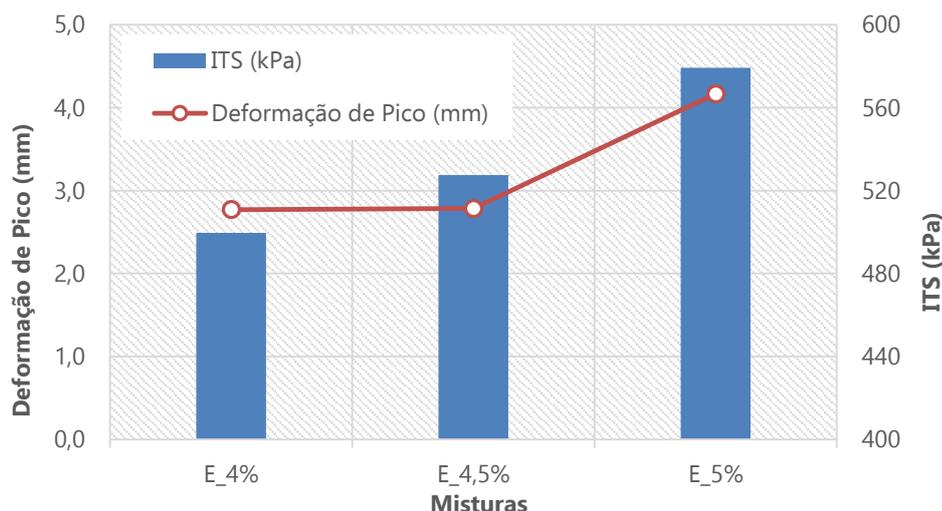


Figura 4.1 - Valores do ITS e da deformação de pico dos provetes secos das misturas tratadas produzidas para determinação do teor ótimo de emulsão

Verifica-se um aumento do ITS com o aumento da percentagem de emulsão. Quando se quer escolher a percentagem ótima de emulsão é fundamental obter uma resistência (ITS) mais elevada, mas sem aumentar muito a deformação na rotura. Além disso, deve ter-se em consideração que a utilização de percentagens de emulsão mais reduzidas é uma melhor solução ao nível do custo. Nesse sentido, a percentagem de 5,0% era a melhor solução em termos de ITS, mas essa solução aumenta as deformações de forma significativa, além de ser a solução menos económica. Além disso, qualquer uma das percentagens de emulsão em estudo apresenta valores de ITS muito superiores ao limite de 225 kPa indicado no manual da Wirtgen (2012), o que se poderá dever à utilização de 2% de cimento (mas ao mesmo tempo confirma as soluções com 4,0% ou 4,5% de emulsão mais interessantes como resultado de formulação, por serem mais económicas e terem a resistência desejada).

Quando se compara a percentagem de 4,0% e 4,5% verifica-se que não há uma grande variação a nível do ITS e da deformação, nem ao nível dos custos envolvidos (embora haja sempre um custo associado a um aumento da percentagem de emulsão betuminosa). Assim, aprofundou-se a análise com os resultados de sensibilidade à água (ITSR e volume de vazios).

Na Figura 4.2 há uma demonstração da variação do ITSR e do volume de vazios nas misturas realizadas para obtenção do teor ótimo de emulsão betuminosa. Ao nível do ITSR (sensibilidade à água) verifica-se uma evolução proporcional ao aumento da percentagem de emulsão betuminosa, enquanto o volume de vazios aumenta na mistura com 4,5% de emulsão betuminosa e depois desce na mistura com 5,0% de emulsão betuminosa.

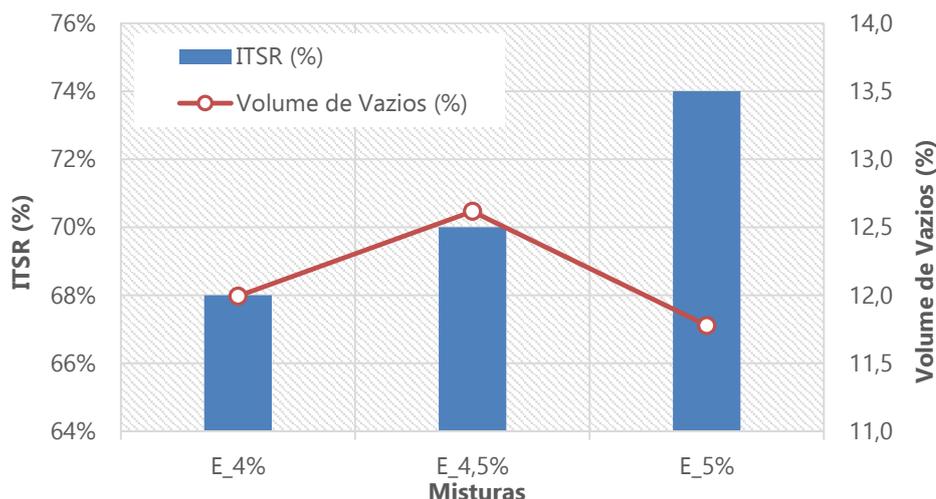


Figura 4.2 - Valores do ITSR e do volume de vazios das misturas realizadas para a determinação do teor ótimo de emulsão

Habitualmente, quanto maior for o volume de vazios de uma mistura, mais essa mistura é sensível à ação da água, isto porque volumes de vazios maiores facilitam a penetração da água na mistura. Esse problema já tinha sido reportado na revisão bibliográfica, e voltou a verificar-se um volume de vazios muito grande nestas misturas. Apesar disso, foi possível obter resultados de sensibilidade à água muito interessantes para misturas produzidas a frio e com volumes de vazios bastante altos, dado que os valores de ITSR variaram entre 68% e 74%, que estão dentro do intervalo máximo de valores indicados no manual da Wirtgen (2012). De facto, a mistura com 5,0% de emulsão é claramente a mistura que apresenta menor sensibilidade à água, pois apresenta valores de ITSR de 74%, enquanto a mistura com 4,0% de emulsão é a mistura que apresenta maior sensibilidade à água (68%).

Dado que não se verificaram grandes diferenças de desempenho entre as misturas com 4,0% (menor custo e menor deformação) e 4,5% de emulsão (maior valor de ITS e de ITSR), optou-se então por definir a percentagem ótima de emulsão betuminosa como sendo 4,25% por forma a obter uma solução com menor custo associado mas que apresenta pouco risco em termos de desempenho.

4.3. Influência da Percentagem de Aditivo na Sensibilidade à Água das Misturas Tratadas

No que diz respeito ao efeito dos aditivos (tipo e percentagem) nos resultados do ensaio de sensibilidade à água e de tração indireta (dos provetes secos) das misturas ABGETE produzidas com o teor ótimo em emulsão, os mesmos são apresentados em seguida.

Inicialmente, apresentam-se os resultados das misturas ABGETE produzidas com cimento como aditivo, nomeadamente ao utilizar 0,5% (Tabela 4.4), 2,0% (Tabela 4.5) e 3,5% (Tabela 4.6) de cimento.

Tabela 4.4 - Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura com 0,5% de cimento

Ensaio	Provete	Deformação de Pico (mm)	ITS (kPa)	ITS médio (kPa)	ITSR (%)	Volume de Vazios (%)	Volume de Vazios (%)
ITS _w	C0,5_1	1,97	142	131	50	13,7	12,9
	C0,5_3	1,54	120			12,7	
	C0,5_4	2,57	132			12,2	
ITS _d	C0,5_2	2,21	251	265		11,1	
	C0,5_5	1,93	289			13,6	
	C0,5_6	1,70	256			14,3	

Tabela 4.5 - Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura com 2,0% de cimento

Ensaio	Provete	Deformação de Pico (mm)	ITS (kPa)	ITS médio (kPa)	ITSR (%)	Volume de Vazios (%)	Volume de Vazios (%)
ITS _w	C2_1	1,68	435	374	79	10,0	10,6
	C2_5	1,95	323			10,2	
	C2_6	1,77	365			8,7	
ITS _d	C2_2	2,06	499	476		11,3	
	C2_3	1,59	405			11,5	
	C2_4	1,87	524			11,9	

Tabela 4.6 - Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura com 3,5% de cimento

Ensaio	Provete	Deformação de Pico (mm)	ITS (kPa)	ITS médio (kPa)	ITSR (%)	Volume de Vazios (%)	Volume de Vazios (%)
ITS _w	C3,5_1	1,29	553	570	86	11,6	10,7
	C3,5_4	1,78	576			11,4	
	C3,5_5	1,39	580			10,4	

	C3,5_6	1,40	606		9,8
ITS _d	C3,5_2	1,68	626	662	10,7
	C3,5_3	1,20	753		10,2

De acordo com os dados anteriores procedeu-se à realização do gráfico da Figura 4.3 para que haja uma melhor interpretação dos resultados do ensaio de tração indireta em função da percentagem de cimento utilizado nas misturas ABGETE.

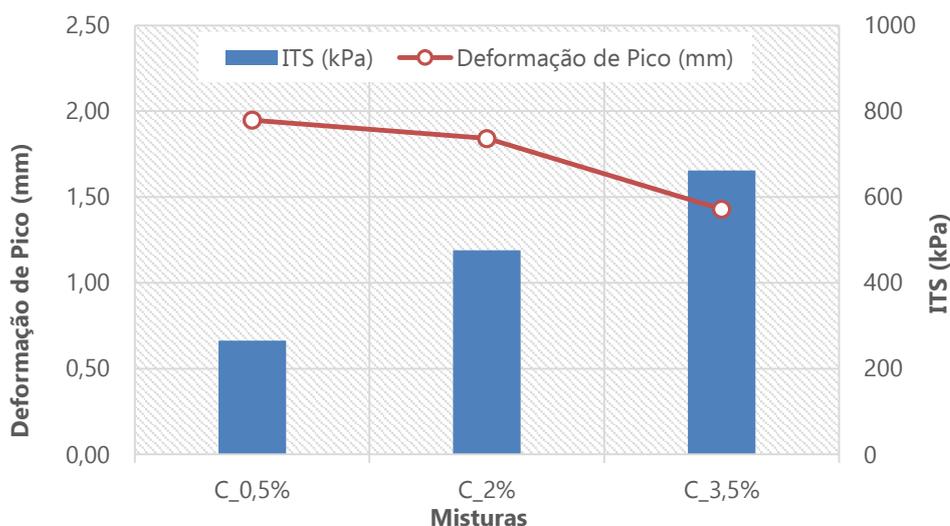


Figura 4.3 - Valores do ITS e da deformação de pico dos provetes secos das misturas realizadas com cimento

Verifica-se que os valores de resistência à tração indireta (ITS) para as três misturas ABGETE realizadas com cimento aumentam de forma considerável à medida que a percentagem de cimento também aumenta. Isto é, a mistura com menor percentagem de cimento (0,5%) possui o menor valor de ITS (265 kPa), enquanto a mistura com maior percentagem de cimento (3,5%) apresenta o maior valor de ITS (662 kPa). Assim, verifica-se que a utilização de cimento tem uma grande influência no valor de ITS deste tipo de misturas, aumentando a resistência 2,5 vezes quando se altera a percentagem de aditivo de 0,5% para 3,5%. Confirma-se ainda que o cimento foi responsável pelos elevados valores de ITS obtidos na formulação destas misturas, dado que o valor de ITS da mistura com 2,0% de cimento é bastante superior à observada na mistura com 0,5% de cimento (que já apresenta um valor de resistência superior ao limite de 225 kPa indicado no manual da Wirtgen (2012)).

Relativamente à deformação de pico na rotura por tração indireta, os valores obtidos encontram-se muito próximos, e todos eles são reduzidos, o que demonstra que a utilização de

cimento reduz muito a deformabilidade das misturas ABGETE, mesmo com apenas 0,5% de cimento. No entanto, é possível afirmar que com o aumento da percentagem de cimento há uma diminuição da deformabilidade das misturas ABGETE, como seria de esperar.

Em seguida, na Figura 4.4 procedeu-se à análise dos resultados de sensibilidade à água, avaliada através dos resultados de ITSR e do volume de vazios das misturas ABGETE com cimento.

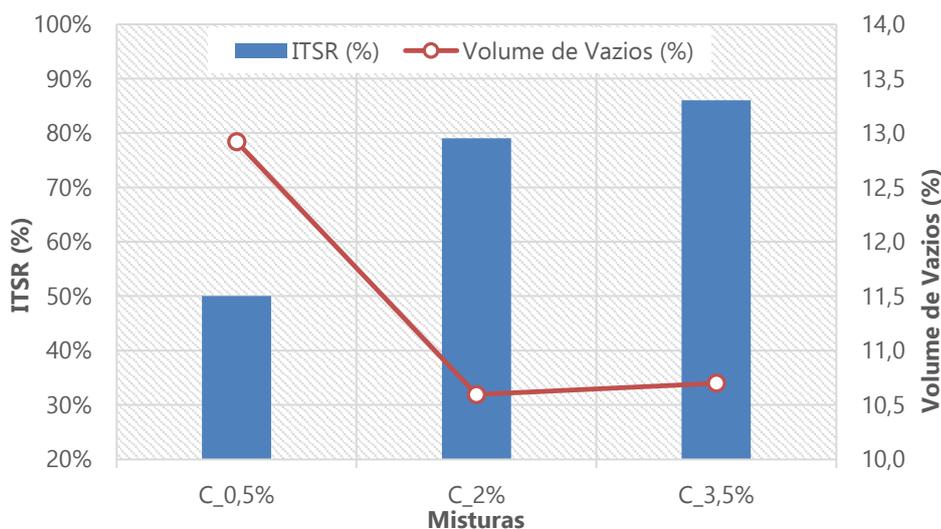


Figura 4.4 - Valores do ITSR e do volume de vazios das misturas realizadas com cimento

Relativamente à sensibilidade à água de cada mistura é possível verificar que as misturas com 2,0% e 3,5% de cimento possuem um valor de ITSR superior a 70%, o que significa que ambas as misturas apresentam uma baixa sensibilidade à água, o que já não se verifica na mistura com apenas 0,5% de cimento (que tem um valor de ITSR próximo de 50%). O maior volume de vazios da mistura com 0,5% de cimento ajuda a explicar a maior sensibilidade desta mistura ABGETE à ação da água. A redução do volume de vazios com o aumento da percentagem de cimento utilizado nas misturas relaciona-se com o aumento da trabalhabilidade garantida pelo cimento, e com a maior quantidade de água que vai reagir com o cimento no processo de cimentação, o que também explica a redução da sensibilidade à água ao aumentar a percentagem de cimento. Com base nos diversos resultados, verifica-se que a utilização de cimento como aditivo nas misturas ABGETE melhora muito as propriedades destas misturas. A percentagem ideal de cimento a utilizar será 2,0% (a utilização de 0,5% não apresenta um desempenho satisfatório, e a utilização de 3,5% não é vantajosa do ponto de vista económico).

Dado que se pretende comparar a utilização de cimento e de cinzas volantes como aditivos destas misturas, apresentam-se em seguida os resultados das misturas ABGETE produzidas com cinzas volantes como aditivo, utilizando as mesmas percentagens de aditivo, nomeadamente 0,5% (Tabela 4.7), 2,0% (Tabela 4.8) e 3,5% (Tabela 4.9) de cinzas volantes.

Tabela 4.7 - Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura com 0,5% de cinzas volantes

Ensaio	Provete	Deformação de Pico (mm)	ITS (kPa)	ITS médio (kPa)	ITSR (%)	Volume de Vazios (%)	Volume de Vazios (%)
ITS _w	CV0,5_1	3.41	116	117	43	12,93	13,8
	CV0,5_2	3.01	120			14,42	
	CV0,5_3	1.64	114			13,40	
ITS _d	CV0,5_4	1.82	275	274		14,67	
	CV0,5_5	1.88	267			14,83	
	CV0,5_6	2.10	281			12,74	

Tabela 4.8 - Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura com 2,0% de cinzas volantes

Ensaio	Provete	Deformação de Pico (mm)	ITS (kPa)	ITS médio (kPa)	ITSR (%)	Volume de Vazios (%)	Volume de Vazios (%)
ITS _w	CV2_1	1,97	157	133	50	12,5	12,5
	CV2_2	1,95	105			15,3	
	CV2_4	2,06	136			12,5	
ITS _d	CV3_2	2,92	260	266		12,1	
	CV2_5	2,43	274			12,0	
	CV2_6	2,23	264			14,7	

Tabela 4.9 - Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura com 3,5% de cinzas volantes

Ensaio	Provete	Deformação de Pico (mm)	ITS (kPa)	ITS médio (kPa)	ITSR (%)	Volume de Vazios (%)	Volume de Vazios (%)
ITS _w	CV3,5_1	1,56	130	127	41	10,63	11,5
	CV3,5_3	1,78	135			12,12	
	CV3,5_5	2,05	115			11,10	
ITS _d	CV3,5_2	1,78	314	308		12,37	
	CV3,5_4	1,96	310			12,53	
	CV3,5_6	2,05	300			10,44	

Na Figura 4.5 apresentam-se de forma gráfica os resultados de resistência à tração indireta para as misturas ABGETE com cinzas volantes, nomeadamente os valores de ITS e a deformação na rotura dos provetes secos.

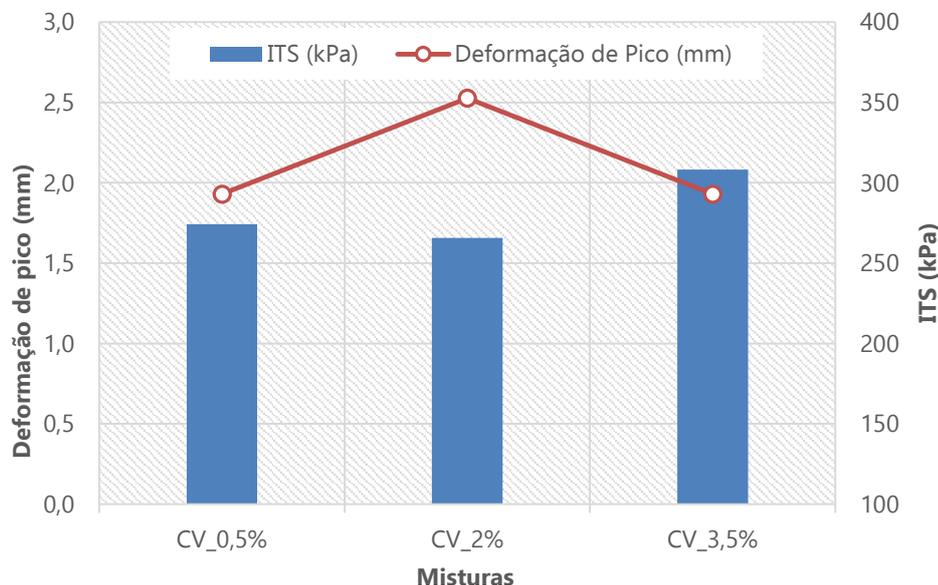


Figura 4.5 - Valores do ITS e da deformação de pico dos provetes secos das misturas realizadas com cinzas volantes

De salientar que não há uma tendência de evolução da resistência ITS como se verificou no caso da utilização do cimento. Todos os valores de ITS são relativamente reduzidos (entre 266 kPa e 308 kPa), próximos do valor obtido com apenas 0,5% de cimento, mas superiores ao limite mínimo indicado no manual da Wirtgen (2012). No entanto, o maior valor de ITS foi obtido para a maior percentagem de cinzas volantes (3,5%). Aparentemente, não estará a ocorrer um processo de cimentação das cinzas volantes (que estão a funcionar como filler) pelo facto de não se ter procedido à sua ativação.

Em relação à deformação de pico na rotura, também se verifica que não há uma grande variação da deformação com a percentagem de cinzas volantes utilizada. Apesar disso, a deformação obtida nestas misturas é ligeiramente superior à observada nas misturas com cimento, o que também terá resultado da reduzida cimentação das cinzas volantes já referida. Confirma-se ainda que a reduzida deformação das misturas ABGETE não resulta essencialmente da utilização dos aditivos, mas da reduzida quantidade de betume residual utilizado nestas misturas.

Em seguida, na Figura 4.6 apresentam-se os resultados de sensibilidade à água, ou seja, a variação do ITSR e do volume de vazios em função da percentagem de cinzas volantes utilizadas.

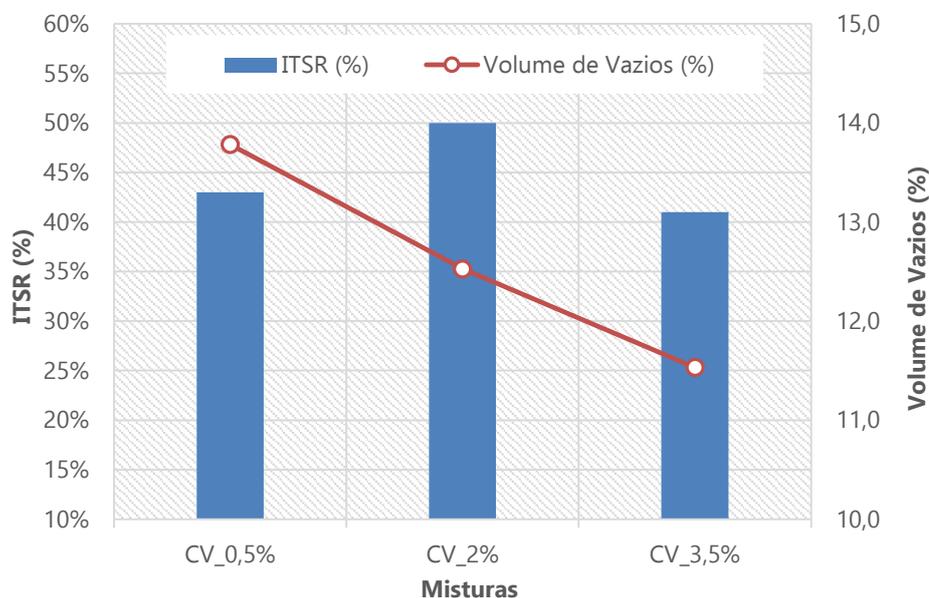


Figura 4.6 - Valores do ITSR e do volume de vazios das misturas realizadas com cinzas volantes

Os resultados de ITSR confirmam que o conjunto de misturas ABGETE produzidas por cinzas volantes possuem uma elevada sensibilidade à água, uma vez que todos os valores de ITSR são inferiores a 50% (claramente abaixo dos 70% indicados no manual da Wirtgen (2012) para misturas ABGETE menos sensíveis à água). Este resultado confirma as observações anteriores sobre a ineficácia das cinzas volantes devido à falta de cimentação deste aditivo.

Os resultados do volume de vazios, mais elevados do que nas misturas com 2,0% e 3,5% de cimento, também justificam a maior sensibilidade à água das misturas com cinzas volantes. No entanto, o volume de vazios desce com o aumento da percentagem de cinzas volantes, pelo efeito de filer que as cinzas volantes têm nestas misturas.

4.4. Evolução da Resistência à Tração Indireta com o Tempo de Cura das Misturas Tratadas

A evolução da resistência à tração indireta ao longo do tempo de cura das misturas ABGETE com cimento, para os períodos definidos anteriormente, foi avaliada através da variação da deformação de pico na rotura, do valor de ITS e da baridade aparente dos vários provetes em

estudo. Os resultados obtidos são apresentados em seguida para as misturas ABGETE com 0,5% (Tabela 4.10), 2,0% (Tabela 4.11) e 3,5% (Tabela 4.12) de cimento.

Tabela 4.10 - Resultados do ensaio de tração indireta do material estabilizado ao usar 0,5% de cimento

Tempo (dias)	Provete	Deformação de Pico (mm)	ITS (kPa)	Baridade (kg/m³)
0	1	1,49	217	2245
2	2	1,58	223	2176
7	3	1,66	307	2196
14	4	2,36	373	2216
28	5	1,67	402	2161

Tabela 4.11 - Resultados do ensaio de tração indireta do material estabilizado ao usar 2,0% de cimento

Tempo (dias)	Provete	Deformação de Pico (mm)	ITS (kPa)	Baridade (kg/m³)
0	1	1,46	417	2228
2	2	2,55	355	2146
7	3	1,60	549	2208
14	4	1,27	529	2228
28	5	1,91	566	2175

Tabela 4.12 - Resultados do ensaio de tração indireta do material estabilizado ao usar 3,5% de cimento

Tempo (dias)	Provete	Deformação de Pico (mm)	ITS (kPa)	Baridade (kg/m³)
0	1	1,86	407	2230
2	2	1,97	537	2262
7	3	3,51	686	2244
14	4	1,31	675	2233
28	5	3,01	734	2217

Em seguida realizaram-se os mesmos ensaios de tração indireta nas misturas de material granular estabilizado com emulsão ao qual se adicionou cinzas volantes como aditivo. Estes resultados serão comparados com os obtidos com cimento, para quantidades iguais de aditivos. Assim, a variação da deformação de pico na rotura, do valor de ITS e da baridade aparente dos vários provetes em estudo são apresentados em seguida para as misturas ABGETE com 0,5% (Tabela 4.13), 2,0% (Tabela 4.14) e 3,5% (Tabela 4.15) de cinzas volantes.

Tabela 4.13 - Resultados do ensaio de tração indireta do material estabilizado ao usar 0,5% de cinzas volantes

Tempo (dias)	Provete	Deformação de Pico (mm)	ITS (kPa)	Baridade (kg/m³)
0	1	1,68	191	2212
2	2	1,87	244	2202
7	3	1,85	332	2175
14	4	2,36	432	2160
28	5	1,88	371	2157

Tabela 4.14 - Resultados do ensaio de tração indireta do material estabilizado ao usar 2,0% de cinzas volantes

Tempo (dias)	Provete	Deformação de Pico (mm)	ITS (kPa)	Baridade (kg/m³)
0	1	1,75	255	2207
2	2	2,06	254	2183
7	3	1,97	339	2184
14	4	2,69	429	2204
28	5	1,98	397	2207

Tabela 4.15 - Resultados do ensaio de tração indireta do material estabilizado ao usar 3,5% de cinzas volantes

Tempo (dias)	Provete	Deformação de Pico (mm)	ITS (kPa)	Baridade (kg/m³)
0	1	2,73	208	2198
2	2	3,40	288	2154
7	3	1,68	321	2185
14	4	1,67	361	2182
28	5	1,63	406	2154

Para ser mais fácil a análise da evolução da evolução das diferentes propriedades analisadas ao longo do tempo de cura, procedeu-se à apresentação gráfica dessa evolução.

Assim, na Figura 4.7 apresenta-se a evolução da resistência à tração indireta a 25 °C (ITS) das várias misturas ABGETE produzidas nesta fase do trabalho, com diferentes tipos e percentagens de aditivo.

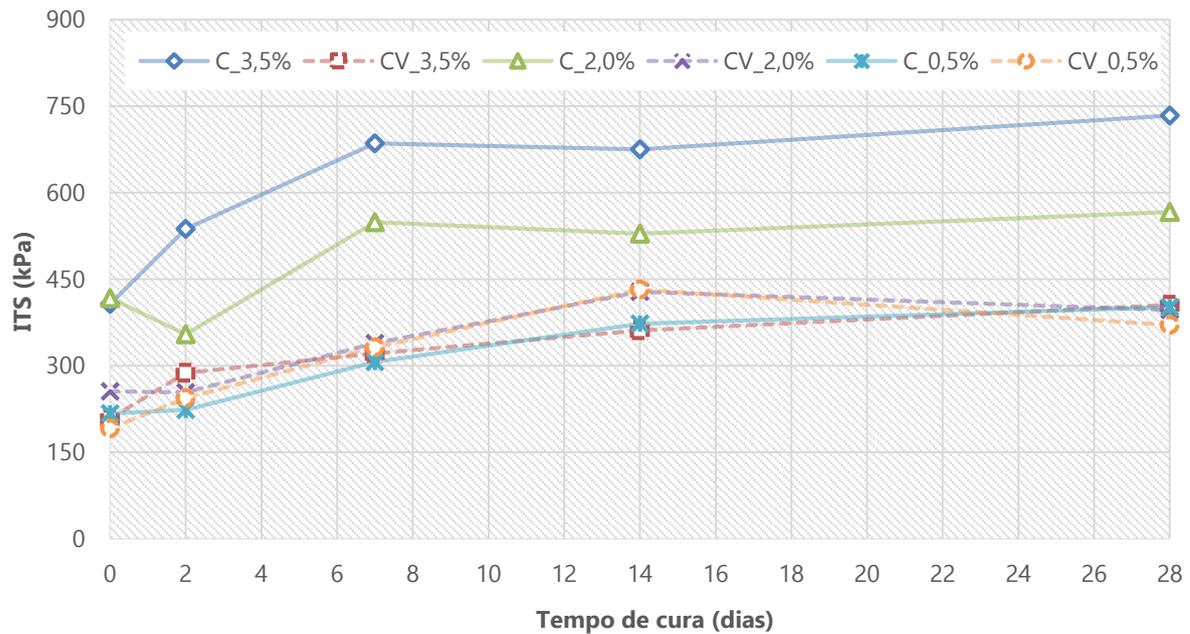


Figura 4.7 - Evolução do ITS com o aumento do tempo de cura

Nas misturas ABGETE com cimento é visível que há um aumento do ITS em função do tempo de cura, ou seja, quanto maior for o tempo de cura, maior é o valor de ITS. Esse aumento não é muito significativo na mistura com 0,5% de cimento, mas torna-se evidente nas misturas com 2,0% e 3,5% de cimento. Existem alguns resultados pontuais que não seguem exatamente essa tendência geral, o que poderá ter acontecido devido a alguma variabilidade que ocorre durante processo de compactação dos provetes, o que faz com que esses valores sejam meramente circunstanciais. O aumento da resistência é tanto maior quanto maior a quantidade de cimento utilizada na mistura. Assim, a mistura ABGETE com 3,5% de cimento é aquela onde se obtêm melhores resultados, uma vez que a estabilização com cimento aumenta a resistência da mistura de forma proporcional à quantidade de cimento usado.

Ao analisar as misturas com cinzas volantes (apresentadas a traço interrompido) é logo possível constatar que os resultados não são tão favoráveis como no caso do cimento. De facto, embora se verifique um ligeiro aumento do ITS de todas as misturas com cinzas volantes ao longo do período de cura considerado, esse aumento não é significativo (independentemente da quantidade de cinzas volantes utilizadas). De facto, o aumento de resistência foi semelhante à observada para as misturas com 0,5% de cimento. Nesse sentido, constata-se que pode existir um processo de cimentação das cinzas volantes, mas que ocorre

de forma lenta e que não depende da quantidade de cinzas volantes utilizadas na mistura, não originando um aumento significativo da resistência das misturas ABGETE.

Assim, não foi possível obter tão bons resultados nas cinzas volantes como no cimento, uma vez que as cinzas volantes são um resíduo produzido em centrais termoelétricas e que não apresenta, à partida, um desempenho tão bom como um material tradicional de construção como é o caso do cimento. Em especial, importa compreender que é necessário proceder à ativação das cinzas volantes para se conseguir aumentar os processos de cimentação deste material, o que não foi realizado neste trabalho para se verificar se essa ativação poderia ser despoletada pelos restantes materiais utilizados na mistura ABGETE, nomeadamente pela emulsão betuminosa (o que na prática não aconteceu).

Em suma, importa perceber que existe uma tendência de aumento do ITS com o tempo de cura, que está vincada em todas as misturas ABGETE e que é visível de forma muito mais evidente nas misturas com cimento, sendo tanto maior quanto maior for a percentagem de cimento utilizada. Em especial, os valores de ITS sobem de forma mais evidente até aos 15 dias e depois há um aumento da resistência ténue ao longo do restante período de tempo.

Relativamente à deformação de pico na rotura (Figura 4.8) das várias misturas ABGETE, verifica-se uma certa variabilidade deste parâmetro que não permite indicar se há uma tendência evidente de variação deste parâmetro com o tempo de cura. Na prática, parece que este parâmetro não é muito sensível ao tempo de cura, havendo uma gama de valores de deformação relativamente reduzidos (entre 1,5 mm e 2,5 mm) que se mantem relativamente constante ao longo do tempo.

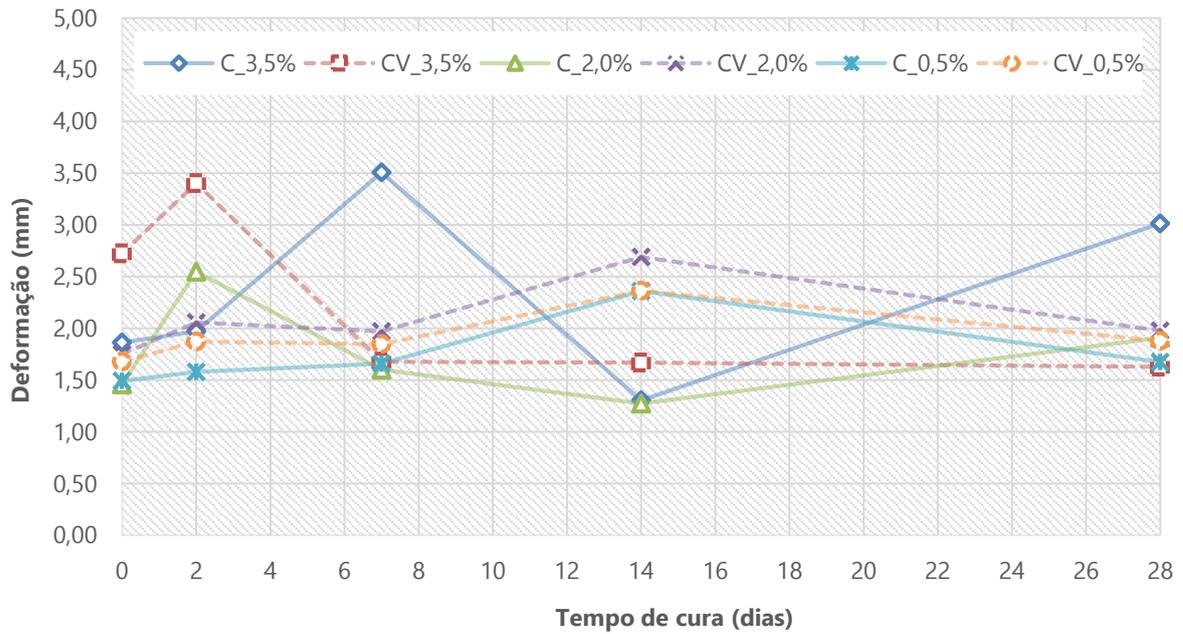


Figura 4.8 - Evolução da deformação de pico com o aumento do tempo de cura

Este facto confirma o reduzido efeito dos aditivos na deformação deste tipo de misturas ABGETE, o que já tinha sido referido anteriormente. Além disso, embora não seja totalmente evidente, os provetes produzidos com cimento aparentam ter valores de deformação ligeiramente inferiores aos observados nas misturas com cinzas volantes.

Finalmente, no que diz respeito à influência do tempo de cura na baridade aparente destas misturas (Figura 4.9), verificou-se que os valores da baridade não demonstram ter uma grande oscilação ao longo do tempo de cura.

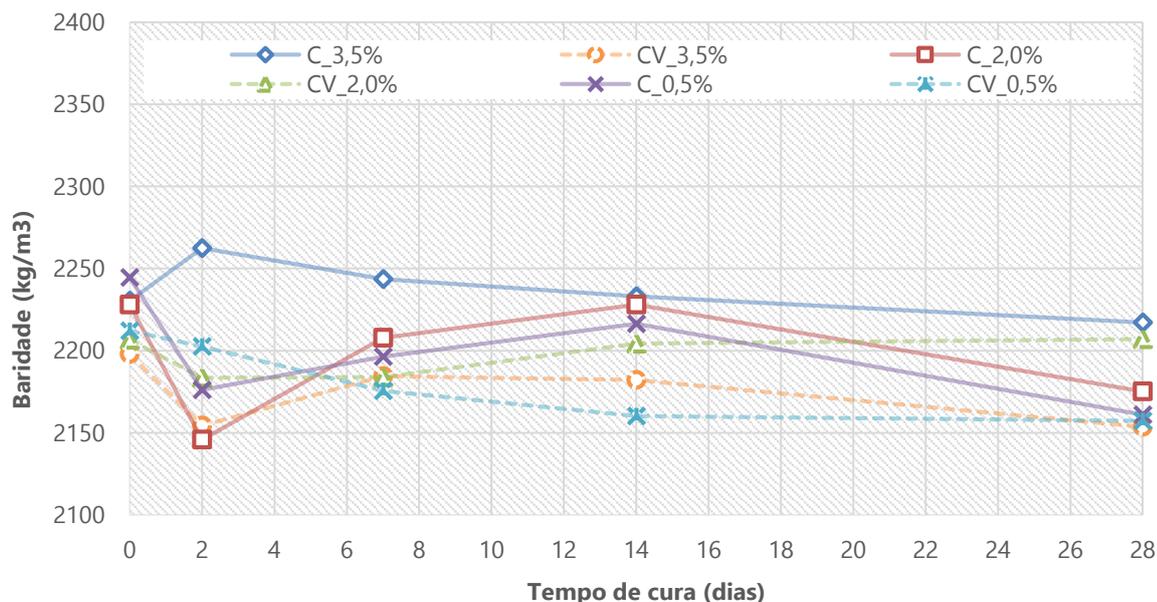


Figura 4.9 - Variação da baridade com o aumento do tempo de cura

No entanto, de uma forma global parece haver uma ligeira redução da baridade aparente ao longo do tempo, o que pode ser uma consequência de alguma evaporação de água que estava incluída na mistura, ou da reação dessa água com os aditivos. Ao comparar os dois tipos de aditivos, verifica-se que as misturas com cimento possuem uma baridade superior, em especial a mistura ABGETE com 3,5% de cimento, o que ajuda a compreender o menor volume de vazios destas misturas.

4.5. Resistência à Deformação das Misturas Tratadas no Ensaio de Compressão Cíclica

No ensaio de resistência à compressão uniaxial cíclica foram utilizados diferentes procedimentos para avaliar a resistência das misturas ABGETE à deformação permanente, nomeadamente utilizando diferentes placas de aplicação de carga. Os resultados obtidos nesse ensaio são apresentados a seguir.

4.5.1. Evolução da deformação permanente das diferentes misturas durante o ensaio

Ao longo do ensaio aplicou-se uma carga cíclica de valor máximo constante, e obteve-se como resposta a variação da deformação permanente dos provetes (medida através de dois LVDTs) em função do número de ciclos de carga, que é apresentada em seguida para cada uma das misturas em estudo.

A deformação permanente (ϵ_n) é obtida através de uma fórmula expressa na norma EN 12697-25 que inclui a altura de cada provete (h_0) e a soma da altura do provete com a deformação que o provete obteve (h_n), de forma a normalizar resultados de deformação para provetes com alturas diferentes. Segundo a norma EN 12697-25, a deformação permanente é a extensão axial acumulada após determinado número de aplicações de cargas e deve ser calculada em percentagem.

Inicialmente, ensaiou-se um provete de mistura betuminosa convencional (AC 14 Surf) para depois se ter termo de comparação com as restantes misturas ABGETE em estudo neste trabalho, medindo a variação da deformação permanente em função do número de ciclos de carga (Figura 4.10). Só se ensaiou um provete desta mistura, utilizando-se o prato de 98,5 mm para aplicar a carga.

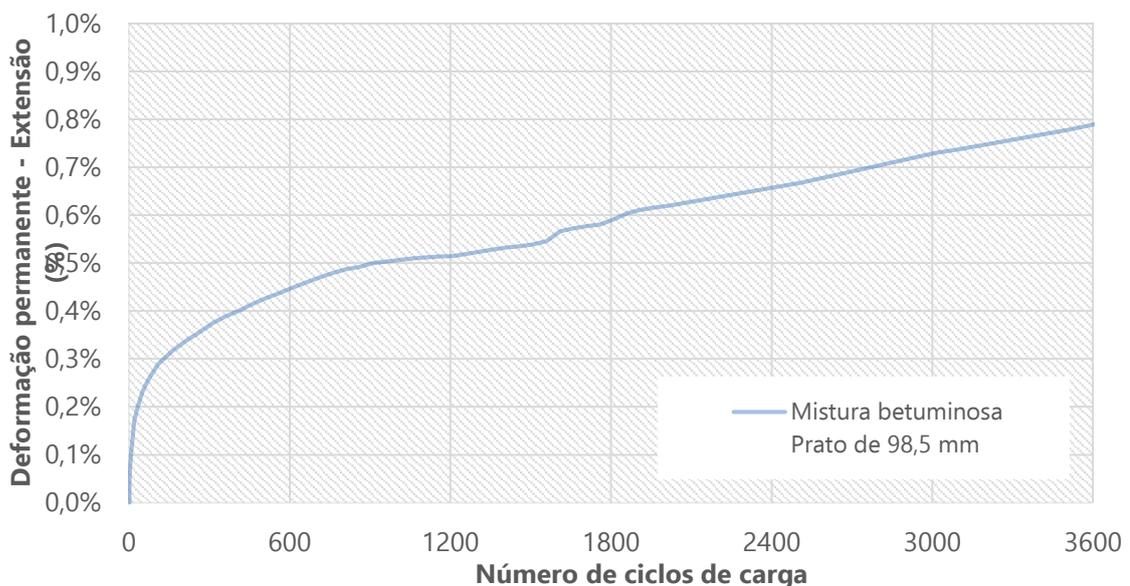


Figura 4.10 – Evolução da deformação permanente em função do número de ciclos da mistura betuminosa de controlo

A deformação da mistura betuminosa não foi muito elevada (extensão de apenas 0,8%), mas a taxa de deformação do provete é superior à que se irá observar nas misturas ABGETE, sendo uniforme ao longo quase todo o todos os ciclos de aplicação de carga.

Convém referir que esta taxa de deformação corresponde à derivada ou inclinação do gráfico que relaciona o aumento de deformação permanente com o número de ciclos de carga já aplicados. Esse valor pode ser determinado ao longo de todo o ensaio impondo um intervalo fixo de análise dessa variável, o que será apresentado posteriormente nesta Dissertação.

Em seguida procedeu-se ao ensaio das diferentes misturas ABGETE produzidas com cimento. Inicialmente ensaiou-se a mistura com 0,5% de cimento, sendo ensaiados 4 provetes com características semelhantes, dois deles com o prato de aplicação de carga de 98,5 mm (provetes 1 e 2) e outros dois com o prato de aplicação de carga de 70 mm (provetes 3 e 4). Os resultados de deformação permanente obtidos para esta mistura são apresentados Figura 4.11.

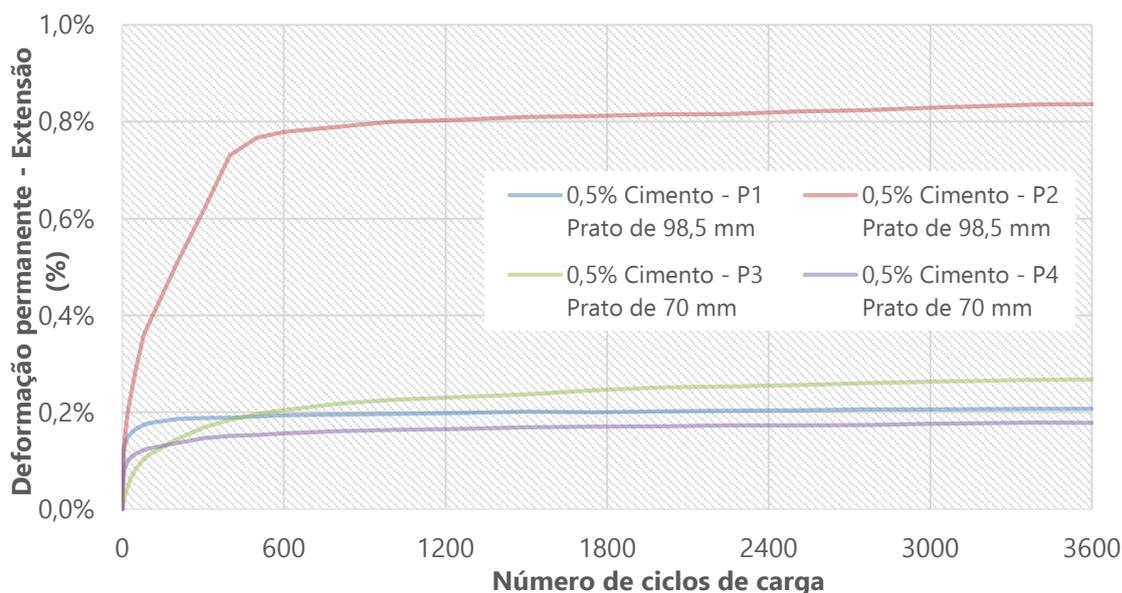


Figura 4.11 - Evolução da deformação permanente em função do número de ciclos da mistura ABGETE com 0,5% de cimento

Duma forma geral, verificou-se que a deformação permanente foi muito reduzida, sendo que na maior parte dos casos foi de apenas 0,2%. No provete 2 verificou-se uma deformação maior em relação aos outros provetes com a mesma percentagem de cimento, o que poderá ter ocorrido devido a eventuais irregularidades na superfície deste provete que originaram uma maior deformação nos primeiros ciclos de carga, mas que diminuiram muito o seu significado a partir dos 1000 ciclos de carga (quando a taxa de deformação é semelhante à dos restantes provetes). De facto, dado que as deformações medidas nestes ensaios são extremamente pequenas, qualquer pequena irregularidade pode influenciar a deformação nos primeiros ciclos de carga, o que se também verificou noutras situações.

No que diz respeito à mistura ABGETE com 2,0% de cimento, realizaram-se unicamente 2 ensaios com um prato de 98,5 mm, como mostra a Figura 4.12.

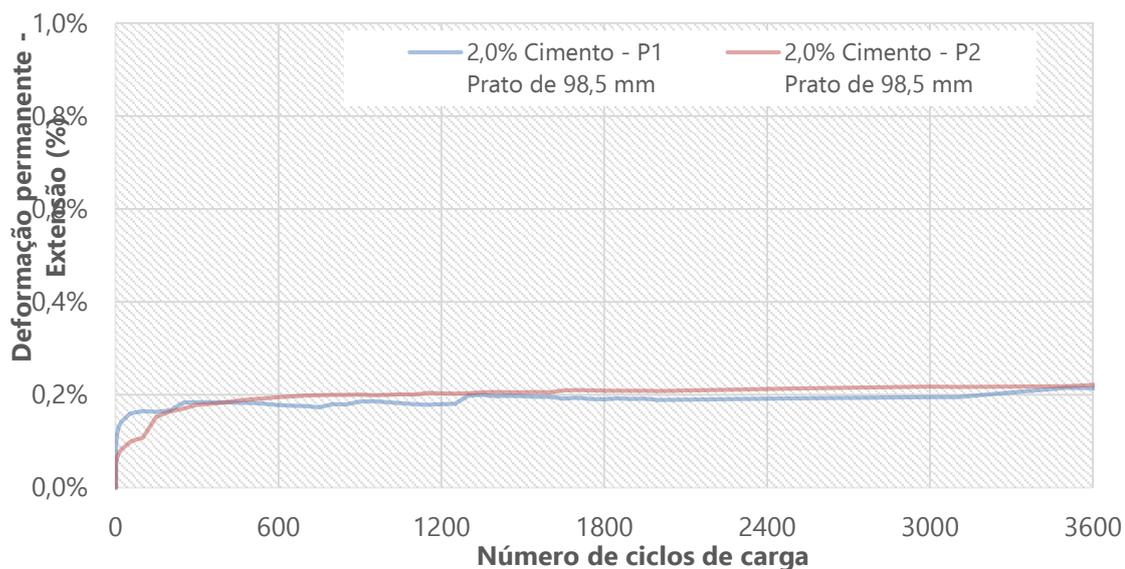


Figura 4.12 - Evolução da deformação permanente com o número de ciclos da mistura ABGETE com 2,0% de cimento

Verificou-se novamente que a variação da deformação foi pouco significativa, e que a deformação permanente ao fim de 3600 ciclos de carga foi apenas 0,2%. Grande parte dessa deformação ocorreu nos primeiros ciclos de carga, pelo que a taxa de deformação a partir dos 1000 ciclos é quase nula.

Finalmente procedeu-se ao ensaio da mistura com 3,5% de cimento. Mais uma vez, realizaram-se unicamente 2 ensaios com um prato de 98,5 mm, como mostra a Figura 4.13.

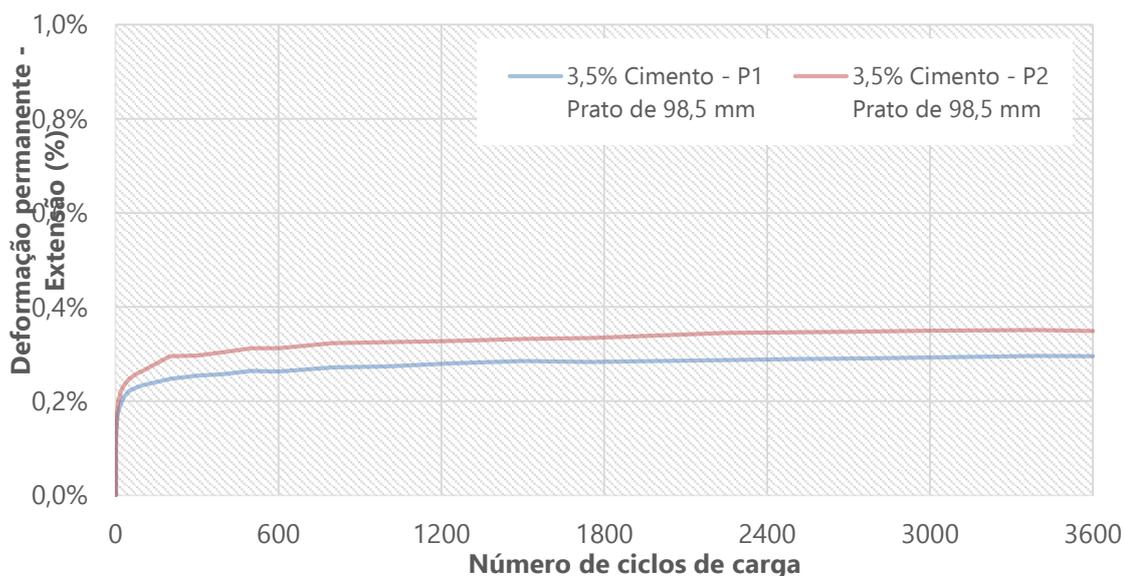


Figura 4.13 - Evolução da deformação permanente com o número de ciclos da mistura ABGETE com 3,5% de cimento

Voltou a verificar-se a tendência esperada de ocorrerem reduzidas deformações (entre 0,3% e 0,4%) nestas misturas ABGETE com cimento. Os dois provetes ensaiados apresentaram um comportamento neste ensaio muito semelhante. No entanto, devido ao aumento da quantidade de cimento utilizado seria de esperar que a deformação pudesse ser ainda menor do que a obtida nas misturas com 0,5% e 2,0% de cimento, o que não aconteceu. Esta situação já tinha sido observada anteriormente em relação à deformação de pico na rotura nos ensaios de tração indireta, quando se concluiu que a elevada resistência à deformação das misturas ABGETE depende mais do material granular do que do tipo e quantidade de aditivo utilizado (embora estes também influenciem esse comportamento).

Depois de concluído o estudo das misturas aditivadas com cimento, em seguida procedeu-se à análise dos resultados obtidos no ensaio de compressão uniaxial cíclico para as misturas ABGETE realizadas com diferentes quantidades de cinzas volantes.

No que diz respeito à mistura ABGETE com 0,5% de cinzas volantes, foram ensaiados quatro provetes com as mesmas características. Neste caso, o provete 1 e 2 foram ensaiados com um prato de 98,5 mm, enquanto os provetes 3 e 4 foram ensaiados com um prato de 70 mm, como mostra na Figura 4.14.

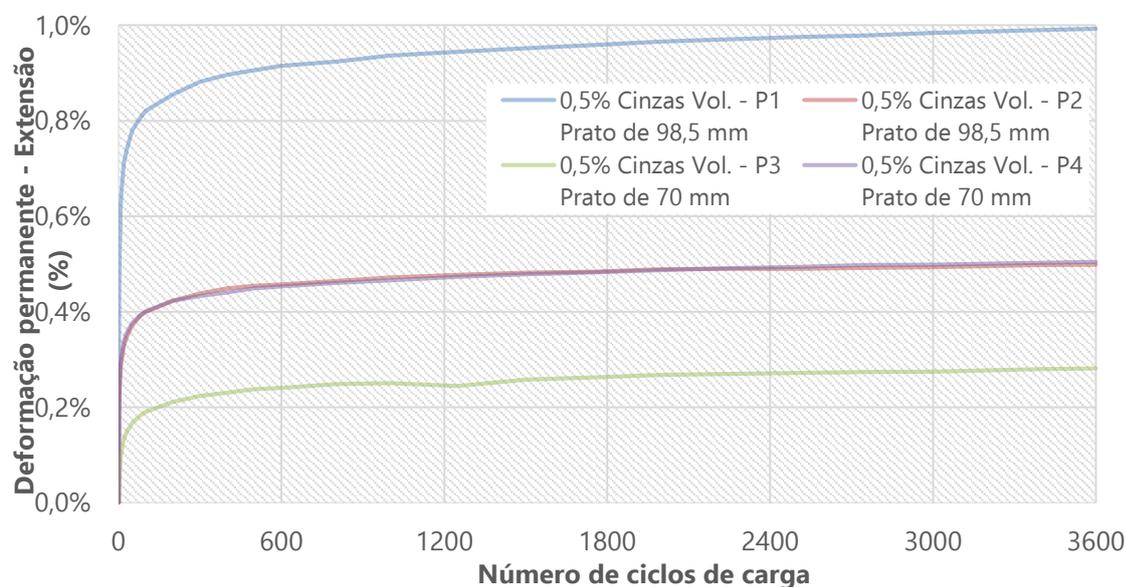


Figura 4.14 - Evolução da deformação permanente em função do número de ciclos da mistura ABGETE com 0,5% de cinzas volantes

Relativamente à deformação, verificou-se alguma variabilidade nos resultados obtidos, com valores totais de deformação a variar entre 0,25% e cerca de 1,0%. O valor de deformação

mais baixo foi próximo do obtido nas misturas com cimento, enquanto o valor de deformação mais alto foi próximo do obtido na mistura betuminosa apesar do tipo de evolução ser diferente. Considera-se que a natureza das cinzas volantes (um resíduo que não foi ativado e não consegue garantir nessas condições a necessária cimentação) podem justificar a maior heterogeneidade dos resultados obtidos. Apesar disso, os vários valores de deformação não são muito elevados, e ocorrem essencialmente nos primeiros ciclos de carga, havendo uma reduzida taxa de deformação depois dos 1000 ciclos. Aparentemente, também se observou uma maior deformação com a placa de 98,5 mm do que com a placa de 70 mm, tal como era esperado.

Em seguida ensaiou-se a mistura ABGETE com 2,0% de cinzas volantes, sendo realizados ensaios em quatro provetes com as mesmas características: os provetes 1 e 3 foram ensaiados com um prato de 98,5 mm e os provetes 2 e 4 foram ensaiados com uma placa de 70 mm, tal como se pode observar na Figura 4.15.

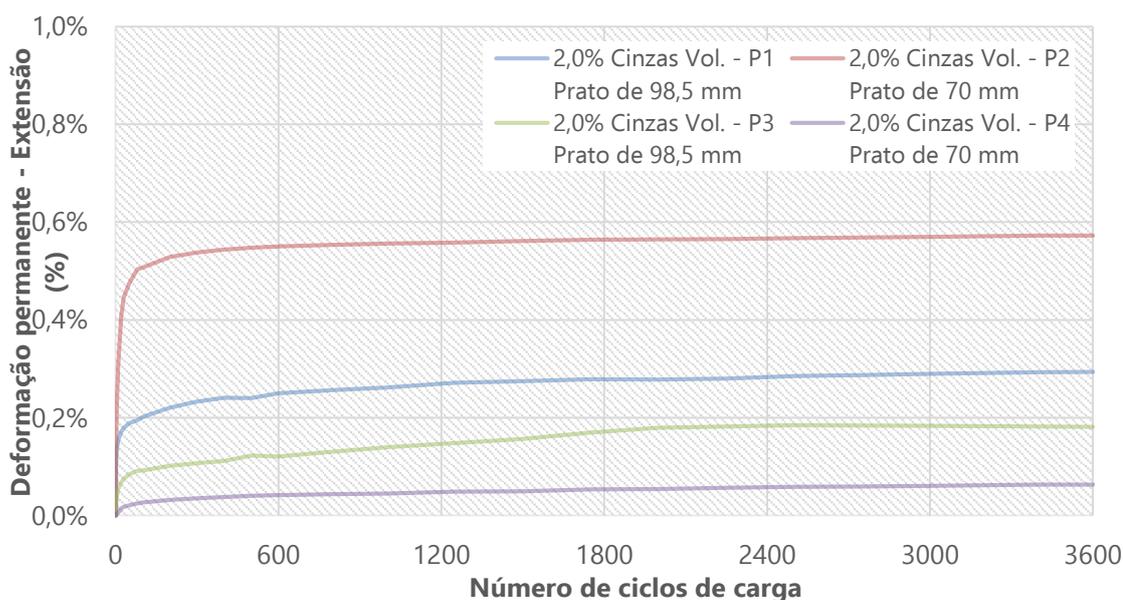


Figura 4.15 - Evolução da deformação permanente em função do número de ciclos da mistura ABGETE com 2,0% de cinzas volantes

Mais uma vez verifica-se uma certa variabilidade dos resultados, com valores de deformação permanente total a variar entre menos de 0,1% e cerca de 0,6%. Além disso, também houve resultados variáveis ao comparar as duas placas de aplicação de carga, dado que um dos provetes ensaiado com a placa de 70 mm obteve a menor deformação, mas outro obteve a maior deformação. A forma dos resultados é semelhante à observada quando se utilizou

apenas 0,5% de cinzas volantes, havendo neste caso menor variabilidade dos resultados e menores valores de deformação permanente.

Finalmente, na Figura 4.16 está explícita a deformação obtida para os diferentes provetes produzidos com a mistura ABGETE com 3,5% de cinzas volantes. De novo, os quatro provetes ensaiados possuem as mesmas características, e a única diferença entre eles centra-se na placa usada para aplicação da carga no ensaio (os provetes 1 e 2 foram ensaiados com um prato de 98,5 mm, enquanto que os provetes 3 e 4 foram ensaiados com um prato de 70 mm).

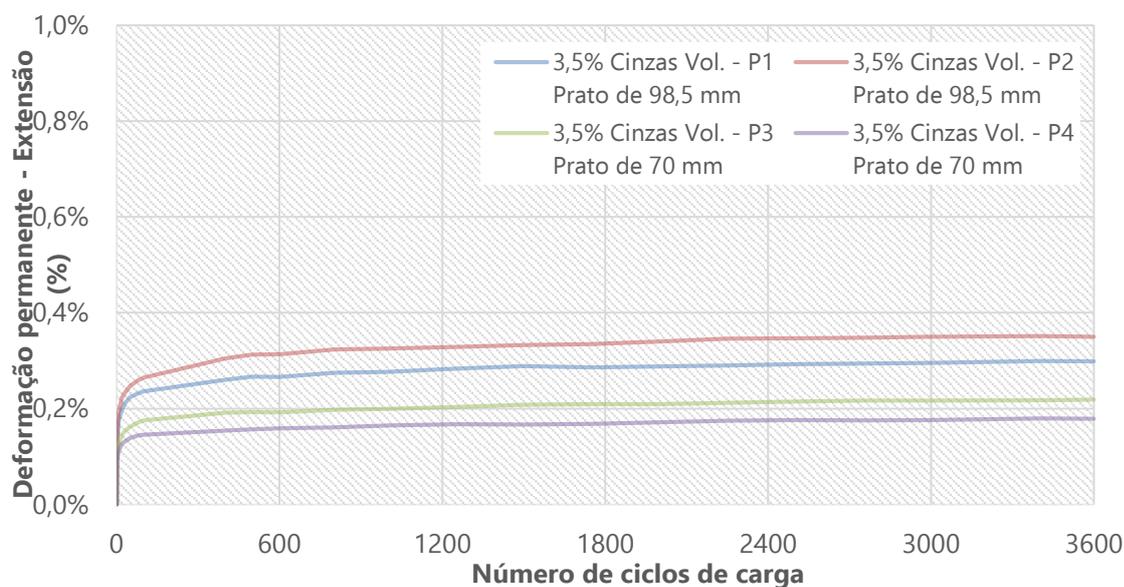


Figura 4.16 - Evolução da deformação permanente em função do número de ciclos da mistura ABGETE com 3,5% de cinzas volantes

Mais uma vez, a forma dos resultados é semelhante à observada quando se utilizou menores quantidades de cinzas volantes, mas a variabilidade dos resultados e os valores de deformação permanente são muito menores neste caso, eventualmente pelo efeito de filer conseguido ao aumentar a quantidade de cinzas volantes usadas. Neste caso, a deformação varia apenas entre 0,2% e 0,35%, aproximando-se dos valores obtidos nas misturas ABGETE com cimento. Também parece ser evidente a menor deformação provocada pela placa de 70 mm, o que está novamente de acordo com o princípio que esteve na base da sua utilização (maior confinamento, e menor deformação).

4.5.2. Avaliação da taxa de deformação das diferentes misturas durante o ensaio

A deformação permanente total medida nos ensaios realizados com as diferentes misturas ABGETE é um indicador de desempenho que pode ser influenciado por alguns fatores, tais como a irregularidade da superfície dos provetes onde é aplicada a carga (o que se verificou em alguns casos descritos atrás). Assim, é importante utilizar outro indicador que se relacione mais com o comportamento intrínseco da mistura durante a execução dos ensaios, e que seja menos suscetível a alguma variabilidade da deformação medida nos primeiros 1000 ciclos de ensaio. Esse parâmetro pode ser a taxa de deformação, medida em microextensão (μstrain) por ciclo de carga, de forma análoga ao valor WTS utilizado na análise dos ensaios de pista.

A taxa de deformação pode ser avaliada apenas pontualmente para um intervalo fixo de ciclos de carga predefinidos (por exemplo, entre 1000 e 3600 ciclos), ou ser avaliada de forma contínua ao longo dos vários ciclos de carga. De facto, a taxa de deformação é a inclinação ou derivada das curvas de deformação permanente apresentadas anteriormente.

Neste trabalho, optou-se por determinar a taxa de deformação duma forma contínua, utilizando um intervalo fixo de 50 ciclos (anteriores a cada ciclo em análise) para determinação do declive correspondente à referida taxa de deformação. Dessa forma, foi possível obter a variação da taxa de deformação ao longo dos vários ciclos de carga aplicados no ensaio de compressão cíclica para cada provete ensaiado, cujos resultados são apresentados em seguida. De referir que nos primeiros ciclos de carga a taxa de deformação é muito elevada, o que não tem interesse para a análise a realizar neste trabalho (apresentando-se apenas valores abaixo de 2,5 ou 2,0 $\mu\text{strain}/\text{ciclo}$).

Inicialmente, na Figura 4.17 está ilustrada a variação da taxa de deformação ao longo dos vários ciclos de carga para a mistura betuminosa de controlo.

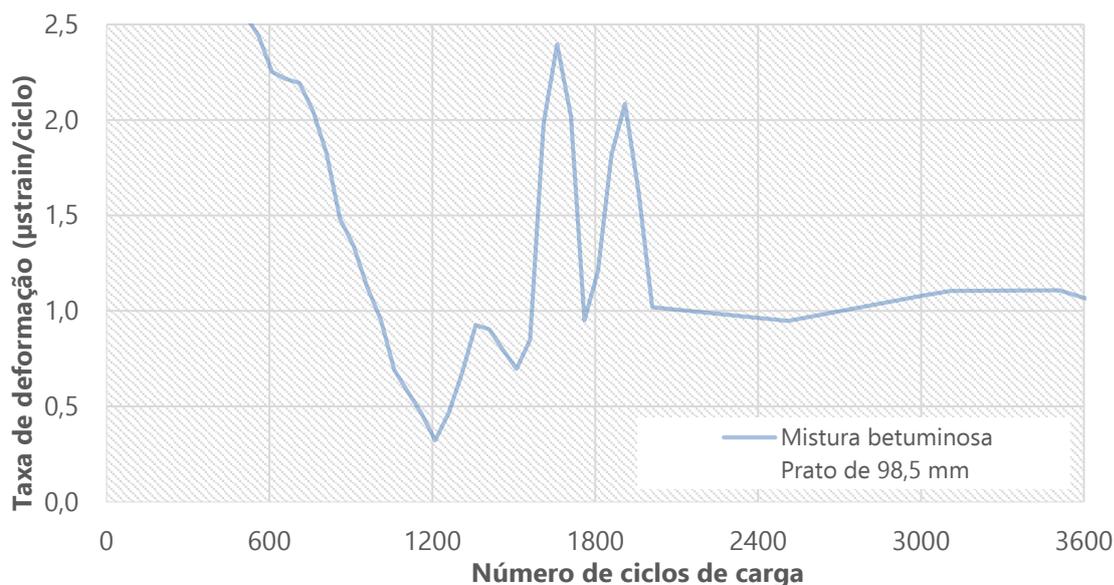


Figura 4.17 – Variação da taxa de deformação da mistura betuminosa de controlo ao longo dos vários ciclos de carga aplicados no ensaio de compressão cíclica

Neste gráfico, pode observar-se uma grande diminuição da taxa de deformação até aos 1200 ciclos, o que corresponde a uma zona onde ainda não se está a avaliar o comportamento intrínseco do material (zona de crescimento inicial muito rápido da deformação). Esta zona é comum a todos os materiais ensaiados, embora possa ser atingida a estabilização da taxa de deformação para um menor número de ciclos de carga noutras misturas.

Depois dessa zona inicial há, habitualmente, uma estabilização do valor da taxa de deformação (na mistura betuminosa em causa há uma estabilização para uma valor de cerca de 1,0 µstrain/ciclo). Quando maior for este valor, maior será a tendência para a mistura em estudo se deformar continuamente sob a ação de cargas externas devido à natureza do próprio material. Ou seja, este valor já não depende de fenómenos que ocorrem durante os primeiros ciclos de carga. De referir que há ainda dois picos até aos 2000 ciclos, que podem ter resultado de algum problema pontual no controlo do equipamento de aplicação de cargas, mas que não se repetiram noutros ensaios.

Em seguida procedeu-se ao mesmo tipo de análise da taxa de deformação para as misturas ABGETE com cimento. Assim, a Figura 4.18 ilustra apresenta a taxa de deformação obtida para os quatro provetes produzidos com 0,5% de cimento.

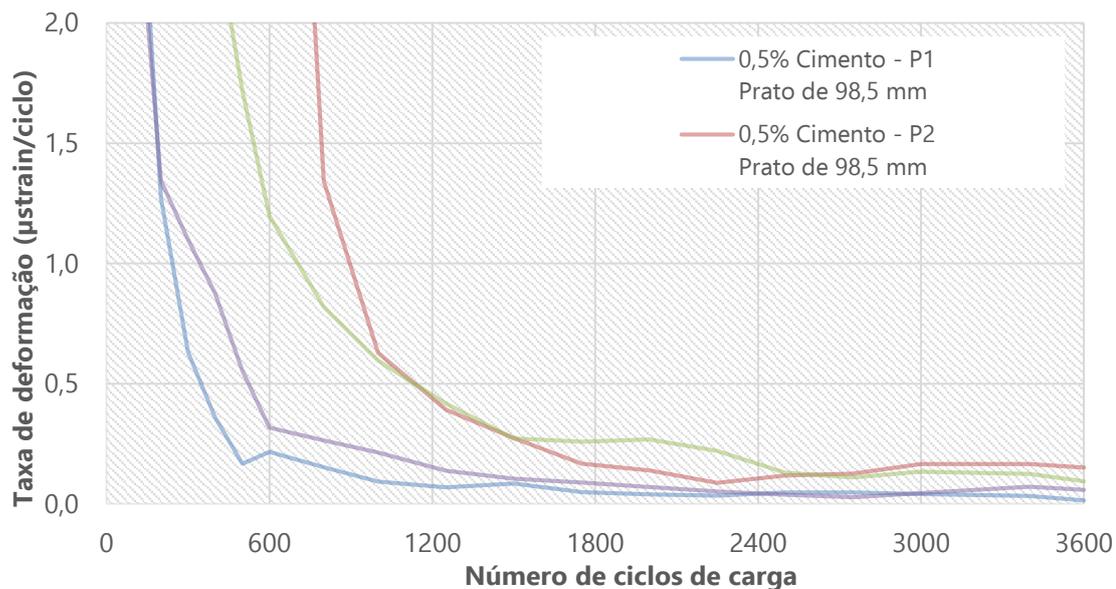


Figura 4.18 - Variação da taxa de deformação da mistura ABGETE com 0,5% de cimento ao longo dos vários ciclos de carga aplicados no ensaio de compressão cíclica

Verifica-se que a taxa de deformação só estabiliza depois dos 1500 ciclos, para um valor muito inferior ao observado na mistura betuminosa (o que se irá verificar em todas as misturas ABGETE). Neste caso, a taxa de deformação estabiliza para um valor entre 0 e 0,2 $\mu\text{strain/ciclo}$. Não é visível de forma clara qual o efeito que o tipo de placa de aplicação de carga teve na determinação deste parâmetro. Assim, esse efeito será estudado mais à frente numa forma mais integrada.

Em seguida procedeu-se à análise da taxa de deformação das misturas ABGETE com 2,0% de cimento, cujo resultado é apresentado na Figura 4.19. Nesta mistura apenas foram ensaiados dois provetes.

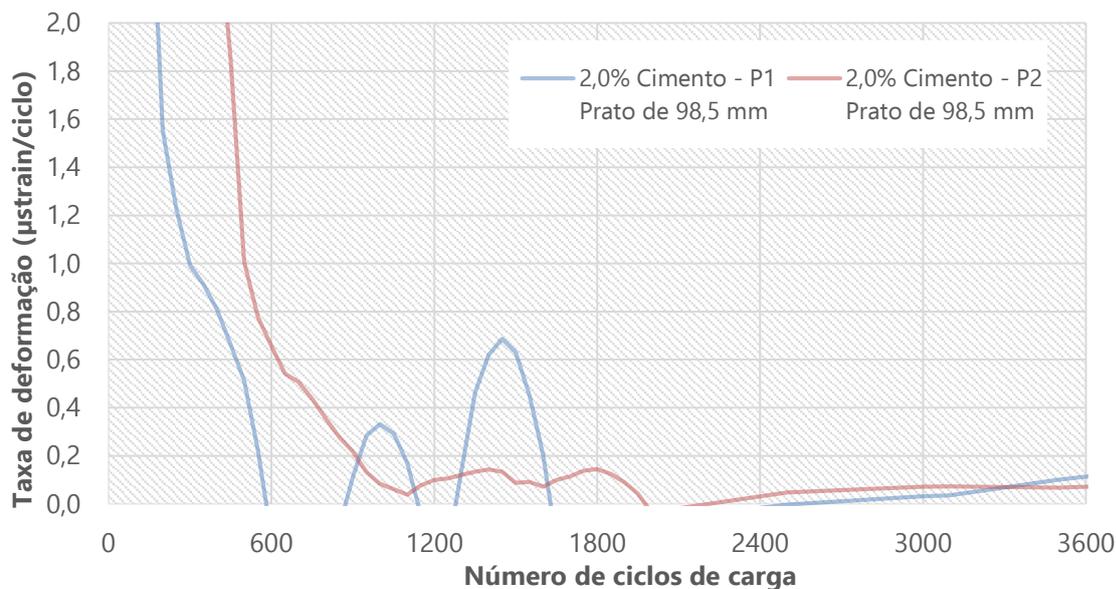


Figura 4.19 - Variação da taxa de deformação da mistura ABGETE com 2,0% de cimento ao longo dos vários ciclos de carga aplicados no ensaio de compressão cíclica

Os resultados obtidos para esta mistura são os mais inconstantes, sendo difícil referir a existência duma estabilização da taxa de deformação. Em parte, este resultado mais estranho resulta da deformação muito reduzida desta mistura, cuja taxa média de deformação é muito próxima de zero. Além disso, terá havido um ajuste mais difícil do nível de força aplicado durante o ensaio, o que levou a uma variação menos constante da deformação, resultando por vezes em valores negativos da taxa de deformação (e originando o resultado apresentado anteriormente). No entanto, pode concluir-se que a taxa de deformação desta mistura é muito baixa, e que a estabilização da taxa de deformação ocorre cerca dos 1000 ciclos de carga.

Finalmente, na Figura 4.20 está ilustrada a variação da taxa de deformação da mistura ABGETE com 3,5% de cimento, sendo perceptível que para esta mistura apenas foram ensaiados dois provetes, os quais já apresentam um resultado dentro do esperado para a análise a efetuar.

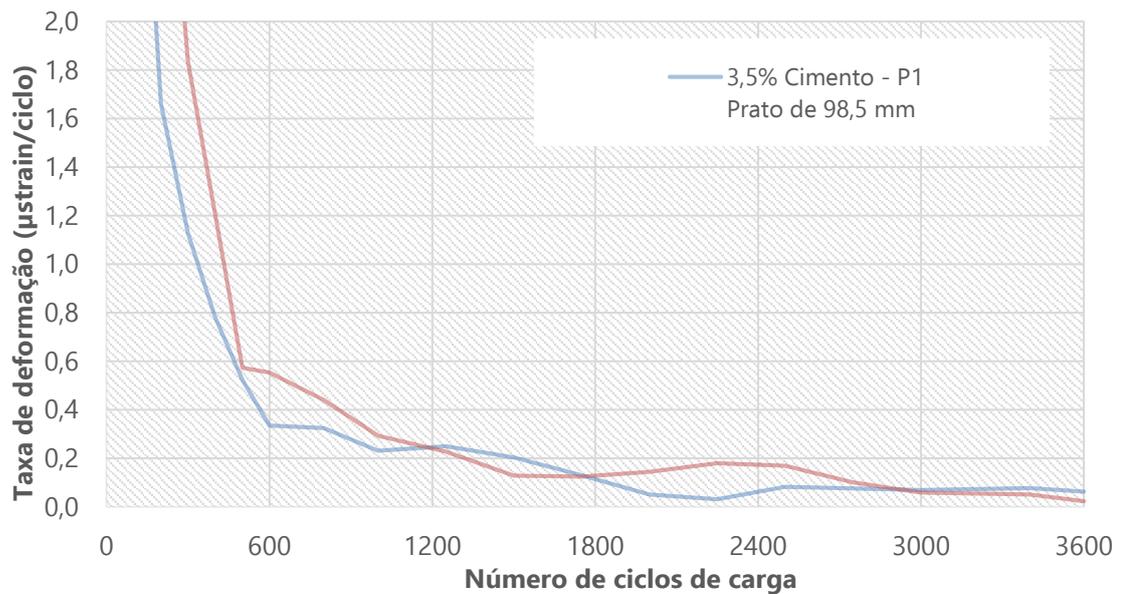


Figura 4.20 - Variação da taxa de deformação da mistura ABGETE com 3,5% de cimento ao longo dos vários ciclos de carga aplicados no ensaio de compressão cíclica

Na mistura ABGETE com 3,5% de cimento pode concluir-se que a taxa de deformação também é muito baixa (varia de 0 a 0,2 $\mu\text{strain/ciclo}$), cuja estabilização ocorre ainda antes dos 1000 ciclos de carga.

Depois de concluída a análise das misturas aditivadas com cimento, em seguida vai proceder-se ao mesmo tipo de análise efetuada às misturas ABGETE com cinzas volantes. A Figura 4.21 ilustra a variação da taxa de deformação dos quatro provetes da mistura ABGETE com 0,5% de cinzas volantes.

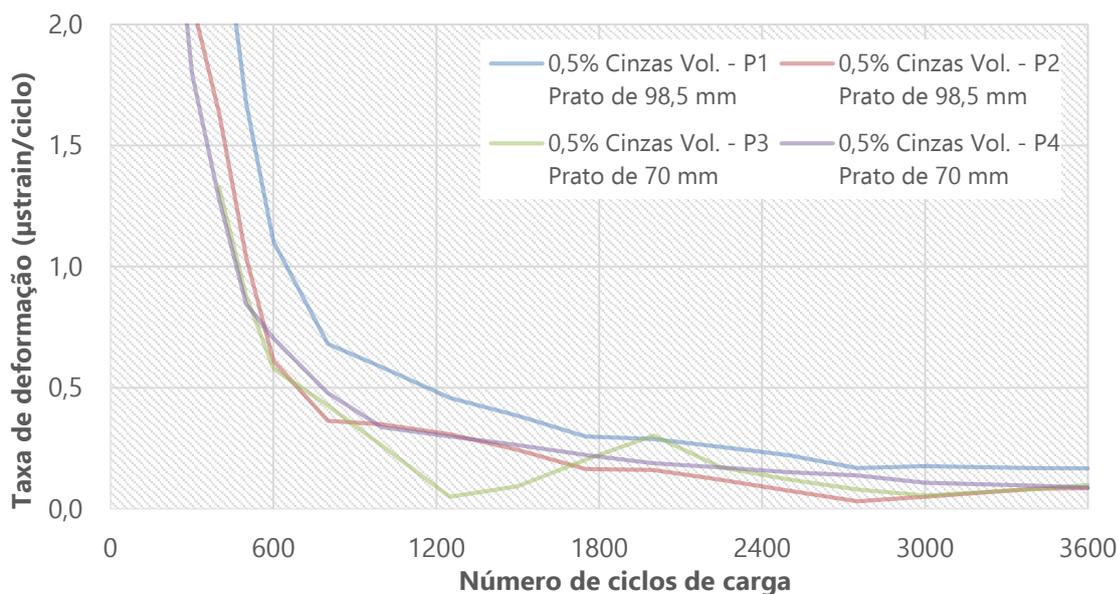


Figura 4.21 - Variação da taxa de deformação da mistura ABGETE com 0,5% de cinzas volantes ao longo dos vários ciclos de carga aplicados no ensaio de compressão cíclica

A taxa de deformação neste tipo de misturas ABGETE com 0,5% de cinzas volantes é próxima ou apenas ligeiramente superior à das misturas com cimento, variando entre 0,1 e 0,2 µstrain/ciclo, mas é importante ter em consideração que há uma maior variabilidade de resultados nestas misturas. A estabilização do valor da taxa de deformação ocorre apenas entre os 1200 e os 1800 ciclos de carga.

Em seguida procedeu-se à análise da taxa de deformação das misturas ABGETE produzidas respetivamente com 2,0% (Figura 4.22) e 3,5% (Figura 4.23) de cinzas volantes

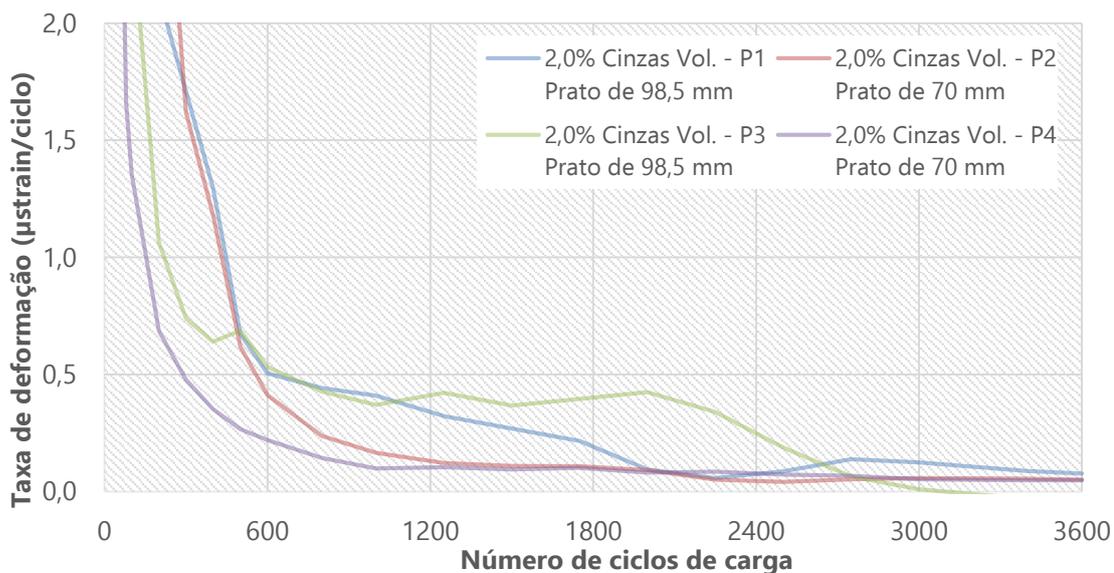


Figura 4.22 - Variação da taxa de deformação da mistura ABGETE com 2,0% de cinzas volantes ao longo dos vários ciclos de carga aplicados no ensaio de compressão cíclica

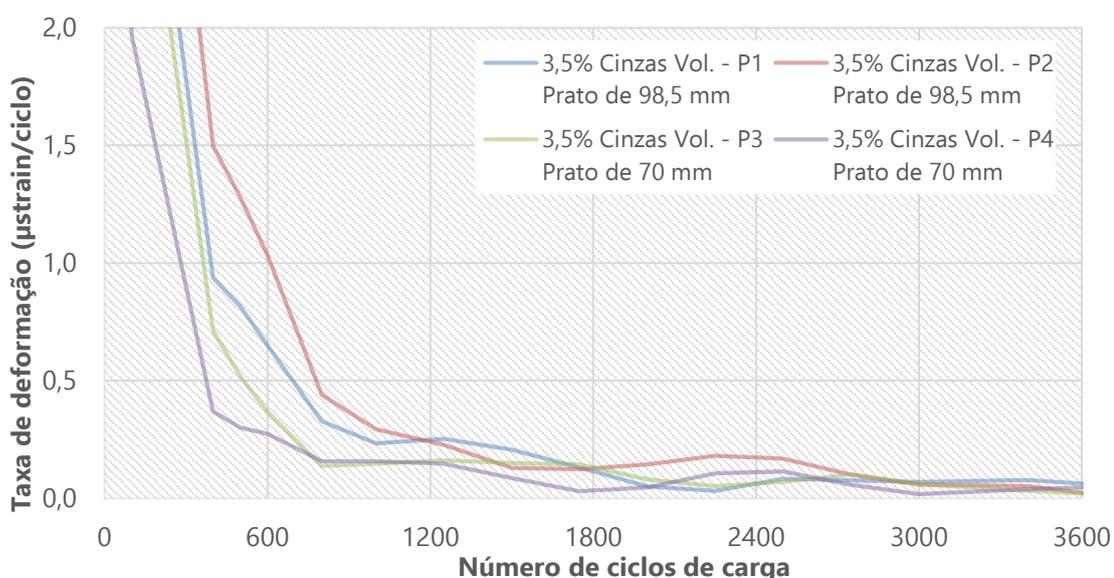


Figura 4.23 - Variação da taxa de deformação da mistura ABGETE com 3,5% de cinzas volantes ao longo dos vários ciclos de carga aplicados no ensaio de compressão cíclica

Para cada uma das misturas referidas, foram ensaiados quatro provetes. Os resultados obtidos para ambas as misturas são semelhantes, embora a taxa de deformação das misturas ABGETE com 3,5% de cinzas volantes pareça ser ligeiramente menor do que com 2,0 do mesmo aditivo. De facto, ambas as misturas têm uma taxa de deformação próxima ou ligeiramente inferior à das misturas com cimento, variando entre 0 e 0,15 $\mu\text{strain/ciclo}$. Neste caso, a estabilização do valor da taxa de deformação ocorre antes dos 1000 ciclos de carga.

4.5.3. Relação entre os resultados de deformação permanente das misturas ABGETE medidos com a placa de 98,5 mm e com a placa de 70 mm

Dado que o nível de carga aplicado em cada caso foi ajustado para manter o nível de tensão de compressão igual nas duas placas, não se espera encontrar grandes diferenças entre ambas. Apesar disso, ao utilizar a placa de 70 mm existe uma zona exterior do provete que não é submetida a tensões de compressão, e que deverá funcionar como “camada de confinamento” que simula melhor a situação real na estrada, e ao mesmo tempo deverá originar níveis de deformação ligeiramente inferiores aos medidos com a placa de 98,5 mm.

Das três misturas ABGETE produzidas com cimento, só a mistura com 0,5% foi ensaiada com as duas placas de aplicação de carga, de 98,5 mm e de 70 mm. Os resultados de deformação permanente obtidos com ambas as placas para essa mistura são apresentados na Figura 4.24.

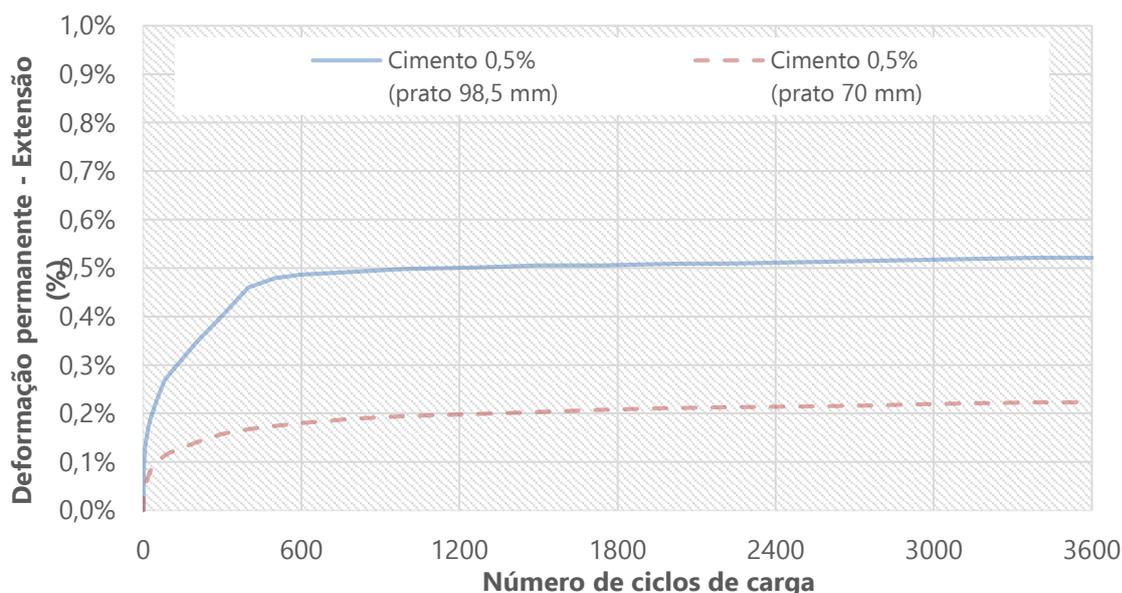


Figura 4.24 - Comparação da deformação permanente medida com a placa de 98,5 mm e de 70 mm na mistura ABGETE com 0,5% de cimento

Tal como se referiu anteriormente, neste caso confirma-se que a deformação permanente foi inferior ao utilizar o prato de 70 mm por comparação com o prato mais largo.

Já no caso das misturas ABGETE aditivadas com cinzas volantes, foram usados os dois pratos para ensaiar todas as misturas produzidas com 0,5%, 2,0% e 3,5% de cinzas volantes. Na Figura 4.25 é ilustrado o gráfico que mostra a média da deformação permanente para cada

placa ao estudar cada uma das três percentagens de cinzas volantes já referidas. Para efeito de comparação, utiliza-se a mesma cor para cada mistura, apresentando a linha contínua os resultados com a placa de 98,5 mm e a traço interrompido os resultados com o prato de 70 mm.

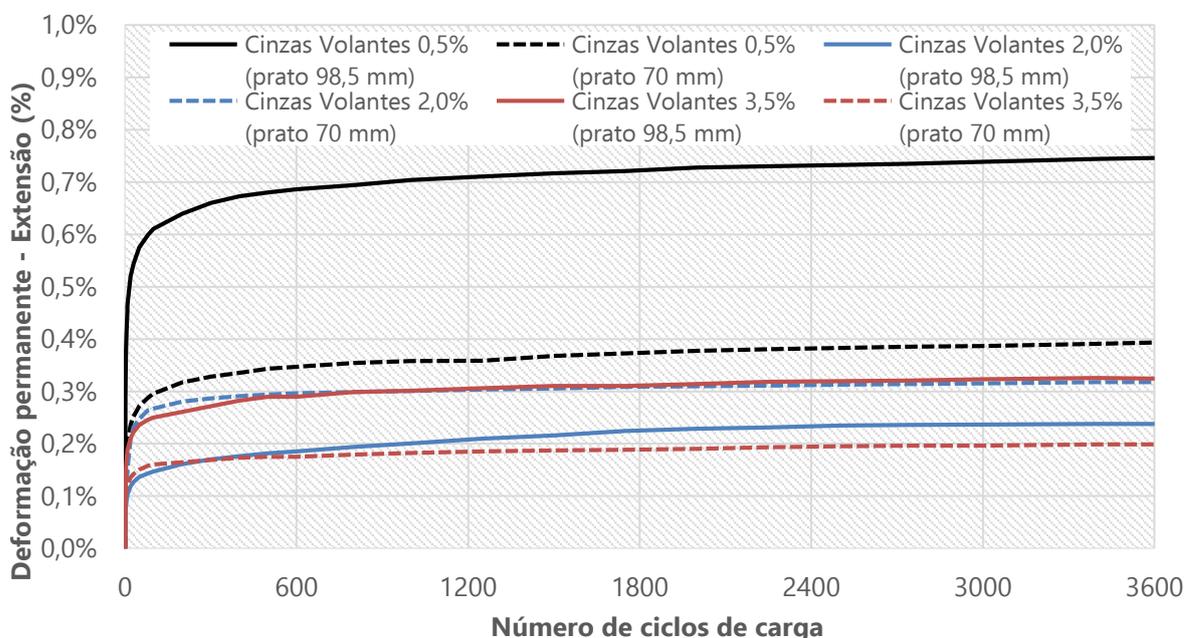


Figura 4.25 - Comparação da deformação permanente medida com a placa de 98,5 mm e de 70 mm nas misturas ABGETE produzidas com 0,5%, 2,0% e 3,5% de cinzas volantes

Na maior parte dos casos confirmou-se que a deformação permanente é menor quando é usado o prato mais estreito de 70 mm de diâmetro, pelas razões já indicadas. Apesar disso, e eventualmente devido à maior variabilidade de resultados já referida para as misturas com cinzas volantes, observa-se uma inversão dos resultados habituais na mistura com 2,0% de cinzas volantes.

Para confirmar se as diferenças entre os dois pratos eram efetivamente resultado das propriedades intrínsecas de resistência à deformação das misturas em estudo, optou-se também por comparar as taxas de deformação correspondentes para a mistura ABGETE com cimento (Figura 4.26) e para as misturas ABGETE com cinzas volantes (Figura 4.27).

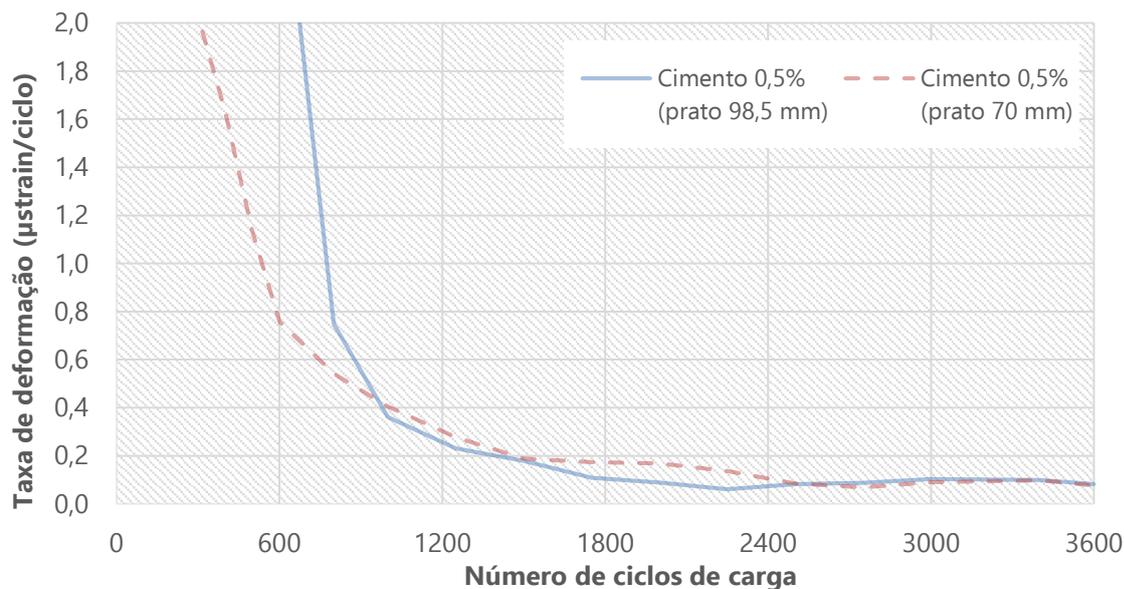


Figura 4.26 - Comparação da taxa de deformação média medida com a placa de 98,5 mm e de 70 mm na mistura ABGETE com 0,5% de cimento

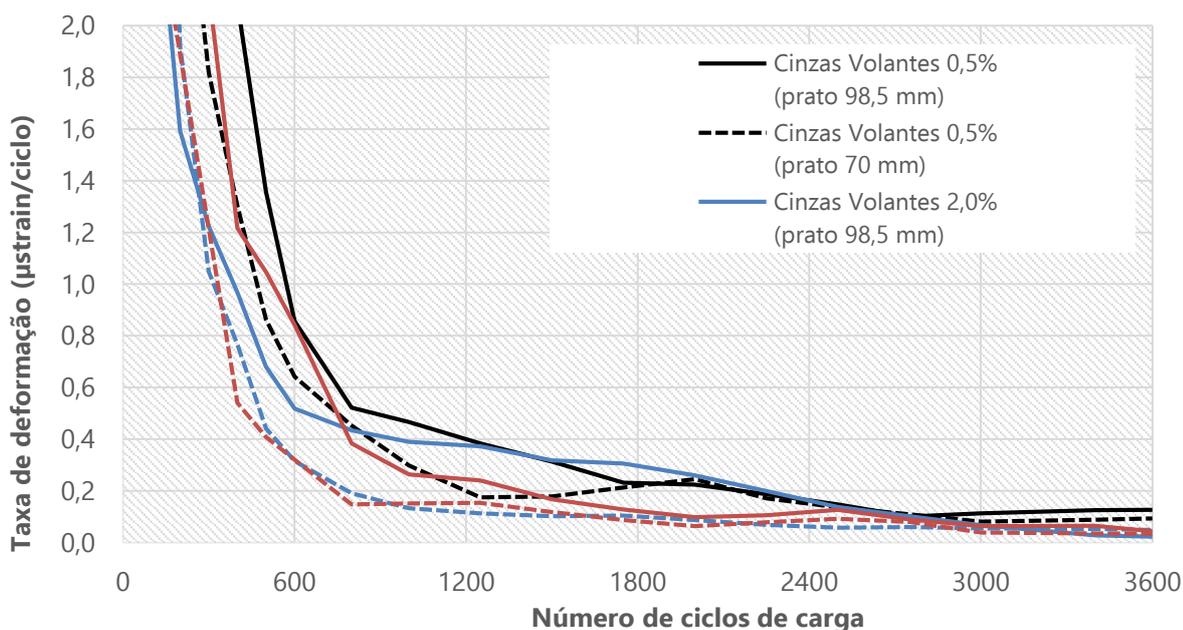


Figura 4.27 - Comparação da taxa de deformação média medida com a placa de 98,5 mm e de 70 mm nas misturas ABGETE produzidas com 0,5%, 2,0% e 3,5% de cinzas volantes

Ao analisar duma forma geral os diversos resultados, é possível concluir que a taxa de deformação média obtida com o prato de 70 mm é normalmente ligeiramente inferior à obtida com o prato de 98,5 mm, como é possível verificar pelo facto das linhas a traço interrompido se situarem duma forma geral ligeiramente abaixo das linhas com traço contínuo (embora as

diferenças sejam mínimas e por vezes se verifique alguma inversão dos resultados aqui descritos).

Assim, confirma-se que a utilização dum prato de menores dimensões para realização do ensaio uniaxial cíclico de compressão permite obter algum confinamento dado pelo próprio provete, reduzindo ligeiramente a deformação permanente e a taxa de deformação.

4.5.4. Comparação da resistência à deformação das diferentes misturas ABGETE com cimento e com cinzas volantes estudadas neste trabalho

De forma a ser possível comparar o desempenho das várias misturas em estudo no que diz respeito à sua resistência à deformação permanente, bem como para proceder a uma análise comparativa com a mistura betuminosa de controlo, optou-se por fazer uma média de todos os resultados obtidos para cada conjunto de provetes de cada mistura ensaiados à compressão cíclica.

Inicialmente comparou-se, na Figura 4.28, a deformação permanente das várias misturas já referidas. Para comparação das várias misturas utilizou-se traço ponto para a mistura betuminosa, traço contínuo para as misturas com cimento, e traço interrompido para as misturas com cinzas volantes.

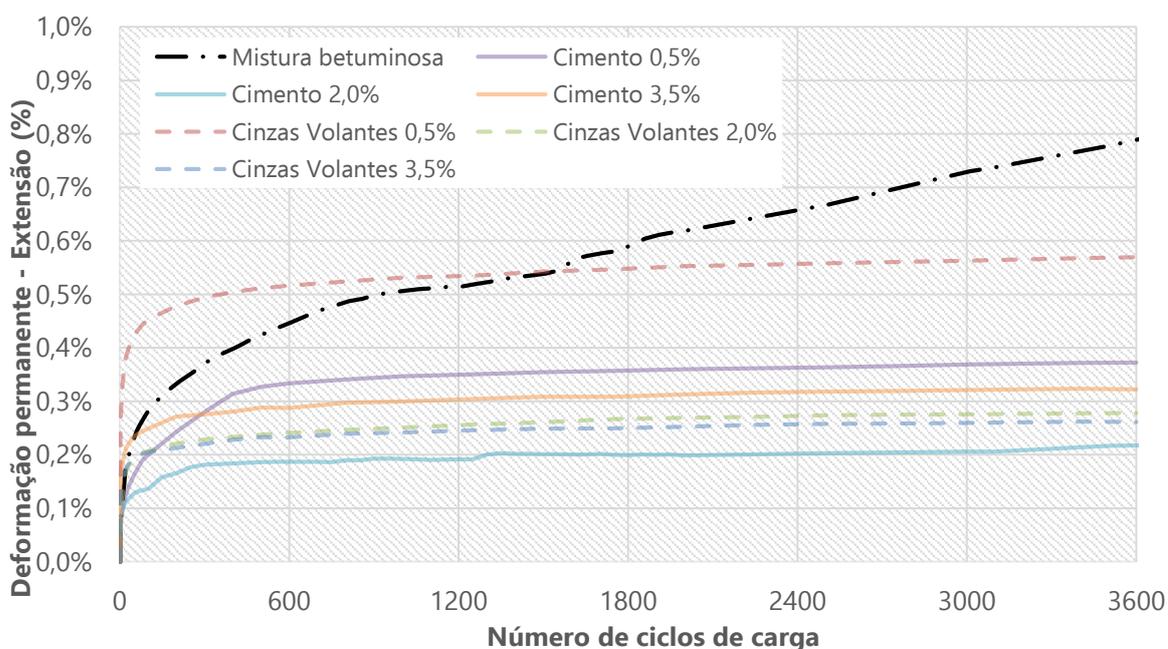


Figura 4.28 - Comparação da deformação permanente da mistura betuminosa e das várias misturas ABGETE produzidas neste trabalho com cimento e com cinzas volantes

Verifica-se que todas as misturas ABGETE estudadas apresentam menor deformação do que a mistura betuminosa, devido ao baixo teor em betume residual (introduzido na emulsão) que é utilizado nessas misturas que são pouco sensíveis à temperatura. A percentagem e o tipo de aditivos (cimento ou cinzas volantes) tem um menor efeito nos resultados obtidos, embora se verifique globalmente que há maior deformação ao utilizar baixas percentagens de ambos os aditivos. Aparentemente as misturas com cimento são mais resistentes à deformação, o que também pode ter resultado da maior variabilidade dos resultados para as misturas com cinzas volantes.

Em seguida, na Figura 4.29 fez-se o mesmo tipo de comparação relativamente à taxa de deformação das várias misturas em estudo.

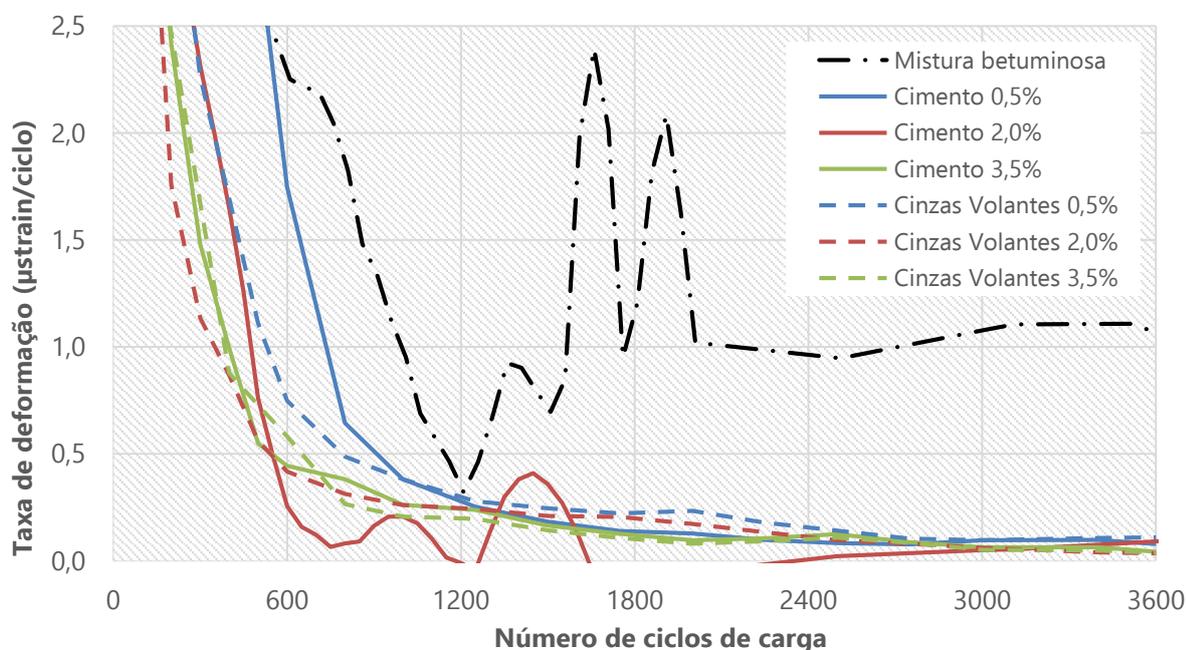


Figura 4.29 - Comparação da taxa de deformação da mistura betuminosa e das várias misturas ABGETE produzidas neste trabalho com cimento e com cinzas volantes

Este resultado confirma que as taxas de deformação de todas as misturas ABGETE são inferiores à da mistura betuminosa de controlo durante todo o ensaio. Observa-se ainda uma grande semelhança entre as várias misturas em estudo, que apresentam taxas de deformação muito próximas e reduzidas (estes materiais são pouco deformáveis). Confirma-se ainda que as misturas com menor quantidade de aditivos (0,5%) apresentam taxas de deformação ligeiramente mais altas, e que as misturas ABGETE com cimento são um pouco mais resistentes à deformação do que as misturas com cinzas volantes.

Por último, na Tabela 4.16 estão expressos os resultados principais de todos os ensaios realizados com as misturas ABGETE com diferentes quantidades e tipos de aditivos. Assim, depois de se ter determinado numa fase inicial de formulação o teor ótimo em emulsão (4,25%), procura resumir-se em seguida as principais propriedades relacionadas com o desempenho destas misturas, nomeadamente a resistência à tração indireta, a sensibilidade à água, o aumento da resistência com o tempo de cura e a resistência à deformação permanente (definida neste caso pela taxa de deformação entre os 1000 ciclos e os 3600 ciclos).

Tabela 4.16 - Tabela resumo de todos os ensaios realizados ao longo do estudo da influência do tipo e percentagem de aditivos (cimento e cinzas volantes) no desempenho das misturas ABGETE

Mistura	Ensaio de Sensibilidade à Água		ITS (kPa) aos 28 dias	Taxa de Deformação (μ strain/ciclo)
	ITS (kPa)	ITSR (%)		
Betão betuminoso	-	-	-	1,101
C_0,5%	265	50	402	0,094
C_2,0%	476	79	566	0,100
C_3,5%	662	86	734	0,085
CV_0,5%	274	41	371	0,136
CV_2,0%	266	50	397	0,089
CV_3,5%	308	41	406	0,073

Ao avaliar o conjunto dos resultados é possível constatar que a sensibilidade à água (ITSR) é a propriedade com maior influência na seleção da composição a utilizar para se garantir um adequado desempenho das misturas ABGETE. Neste caso, os resultados desse ensaio limitavam as opções de composição à seleção entre utilizar 2,0% ou 3,5% de cimento, dado que as restantes combinações são muito sensíveis à água. Tal como se referiu atrás, entre estas duas soluções seria mais lógico utilizar 2,0% de cimento por razões económicas.

Verifica-se ainda que para a percentagem de 3,5% de cimento o valor de ITS obtido ao fim de 28 dias de cura é significativamente maior do que nas restantes alternativas. Também se verifica que as cinzas volantes não são uma alternativa ao cimento caso não se proceda à sua ativação (por exemplo, através de agentes alcalinos), dado que não se nota um aumento da resistência das misturas (pelo menos de forma imediata) ao utilizar percentagens crescentes de cinzas volantes.

Por último, observa-se que este tipo de misturas (ABGETE) não apresentam grandes problemas de deformação permanente, comportando-se bem mesmo com quantidade muito reduzidas de aditivos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPETIVAS FUTURAS

5.1. Conclusões

O principal objetivo desta dissertação prendeu-se com a tentativa de tratar materiais granulares com emulsão betuminosa, adicionando aditivos como é o caso do cimento e das cinzas volantes. O objetivo primordial foi atingido através de vários ensaios realizados nos quais se determinou a resistência dos provetes, bem como a sensibilidade à água, a deformação permanente e a taxa de deformação.

O estudo dos materiais granulares tratados com emulsão betuminosa demonstrou que a sua utilização pode realmente ser uma alternativa face as soluções normalmente utilizadas e que se poderá tornar-se benéfico tanto a nível de resistência estrutural como a nível financeiro, no entanto será necessário realizar uma análise económica e uma aplicação em obra para se obter a certeza das suas vantagens. De um modo geral, no que se refere à produção das misturas estabilizadas, verificou-se que a aplicação de emulsão betuminosa em materiais granulares, quando associados a aditivos, melhoram significativamente a resistência das camadas granulares onde são aplicados, garantindo-se assim a possibilidade de futuramente não ser necessário um custo tão grande com a manutenção dos pavimentos, uma vez que se pode diminuir a quantidade de betume utilizado nas camadas betuminosas do pavimento.

Na fase inicial de formulação, verificou-se que a percentagem ótima de emulsão a utilizar para produção das misturas ABGETE seria de 4,25%, de forma a garantir uma elevada resistência, mas sem aumentar muito a deformabilidade destas misturas.

No seguimento do estudo com os aditivos, constata-se que o cimento tem um nível de resistência muito mais elevado do que as cinzas volantes, uma vez que a sua resistência é bastante superior (em especial quando se utiliza pelo menos 2,0% de cimento). No entanto, no caso das cinzas volantes, mesmo sendo um resíduo, também se verificou um aumento da resistência das misturas aquando da sua utilização, em especial quando se determinou um aumento da resistência com o tempo de cura.

Em relação ao ensaio de sensibilidade à água as conclusões são semelhantes. No que diz respeito ao cimento, o ITS aumenta com o aumento da percentagem de cimento. No caso das cinzas volantes isto não aconteceu, uma vez que as cinzas volantes não foram ativadas,

embora fossem obtidos alguns ganhos ao longo do tempo. No que diz respeito ao ensaio de tração indireta com diferentes tempos de cura, é importante frisar que o resultado obtido deve ser utilizado apenas como método indicativo de que a resistência sobe até aos 15 dias e que depois se mantém quase constante o restante tempo.

Ao nível do ensaio de resistência à compressão uniaxial, a deformação da mistura betuminosa mostrou-se claramente superior à deformação dos provetes dos materiais granulares tratados (ABGETE) que estão na base deste trabalho, o que é mais outro aspeto positivo destas soluções. De um modo geral a deformação permanente e a taxa de deformação dos provetes realizados neste estudo encontram-se abaixo (ou seja, há menor deformação) do que nos parâmetros correspondentes medidos no provete de controlo produzido com mistura betuminosa.

Relativamente à comparação entre as placas, a placa mais estreita de 70 mm origina no geral uma maior resistência à deformação permanente, embora o provete com 2% de cinzas volantes tenha apresentado um resultado inverso a este.

Considera-se que, de uma forma geral, os resultados obtidos com todo este estudo trouxeram novas visões à área da pavimentação, e acredita-se que futuramente estas soluções poderão ser aplicadas de alguma forma na pavimentação real para fazer a diferença nessa área.

5.2. Trabalhos futuros

Esta dissertação permitiu desenvolver conhecimentos no que diz respeito as estabilizações com emulsão betuminosa (aditivada com cimento) sem recurso a reciclagem, o que faz com que haja muito trabalho a desenvolver no que diz respeito às estabilizações com emulsão betuminosa com recurso a reciclagem. Também se pode prosseguir este estudo de misturas tratadas a frio com o estudo de soluções de tratamento com cimento (onde este material é utilizado como ligante, e não apenas como um aditivo da mistura).

No presente estudo recorreu-se à estabilização de materiais granulares com emulsão betuminosa e aditivos. No entanto, propõe-se que num estudo futuro, essa estabilização seja realizada recorrendo ao betume espuma e que seja feita uma comparação entre a estabilização de materiais granulares recorrendo a emulsão betuminosa e ao betume espuma. Para isso, propõem-se também que a percentagem de aditivos adicionados à mistura seja a mesma (em

princípio 2,0% de cimento) e que, assim, se verifique qual das duas aplicações obteria melhores resultados.

No estudo realizado considerou-se que a percentagem de 3,5% de cimento é a percentagem com maior resistência mecânica, o que faz com que se proponha que em trabalhos futuros as percentagens consideradas de aditivos sejam mais elevadas, apesar de esse aumento implicar um maior custo associado às misturas.

Uma vez que os resultados obtidos com as cinzas volantes não foram tão significativos, propõe-se que futuramente se proceda à ativação de cinzas volantes (e à sua introdução em novas misturas ABGETE) por forma a verificar se haveria uma alteração dos resultados que justificasse uma nova comparação.

Também seria útil que se estudasse uma mistura só com emulsão betuminosa e outra mistura só com betume espuma para servir de comparação às misturas realizadas neste trabalho e às novas misturas que se propõe realizar. De facto, a produção destas misturas iria ajudar a demonstrar qual a importância da utilização de aditivos nas misturas ABGETE.

Caso seja possível, considera-se fundamental a construção dum trecho experimental onde se possam testar as soluções já desenvolvidas neste trabalho, nomeadamente a mistura ABGETE com 4,25% de emulsão e 2,0% ou 3,5% de cimento. Um trecho desse tipo ajudaria os donos de obra a compreender a importância destas soluções para pavimentação.

Para finalizar, todo este processo de investigação torna-se uma mais-valia no desenvolvimento de qualquer país, uma vez que propõe soluções benéficas e sustentáveis no que diz respeito à área das infraestruturas de transportes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al Nageim, H., Al-Busaltan, S.F., Atherton, W., Sharples, G. (2012). A comparative study for improving the mechanical properties of cold bituminous emulsion mixtures with cement and waste materials, *Construction and Building Materials*, Vol. 36, pp. 743-748.
- Almeida, L.R.d., Bessa, I.S., Vasconcelos, K.L., Bernucci, L.L.B., Beja, I.A., Chaves, J.M. (2014). Análise de Propriedades Físicas e Mecânicas de Misturas Asfálticas Recicladas a Frio com Emulsão Asfáltica e Cimento Portland e a Influência de cada Material, *XXVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, Curitiba.
- Antunes, M.L., Freire, A.C., Fernandes, D., Pereira, F.C. (2013). Avaliação da Qualidade de Misturas Betuminosas a Frio para Reparação Rápida de Pavimentos, *7º Congresso Rodoviário Português*, Lisboa.
- ASMG (2016). *Emulsion Stabilized FDR*, All States Materials Group; http://www.asmg.com/services_reclamation_emulsion.html; Acedido em 22 de fevereiro de 2016.
- Balbo, J.T. (2007). *Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração*, São Paulo.
- Baptista, A.M.C. (2006). *Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central - Contribuição para o seu Estudo e Aplicação*, Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Coimbra.
- Batista, F.A., Antunes, M.d.L. (2004). Reabilitação de Pavimentos Utilizando Misturas Betuminosas a Frio, *III Congresso Rodoviário Português – Estrada 2004*, Lisboa.
- Batista, F.A., Antunes, M.L. (2006). Desempenho de Misturas Betuminosas Recicladas a Frio, *Seminário LNEC/CRP - Pavimentos Rodoviários Verdes*, Lisboa.
- Batista, F.A.B.A. (2004). *Novas Técnicas de Reabilitação de Pavimentos - Misturas betuminosas densas a frio*, Tese de Doutoramento, Universidade do Porto, Porto.
- Bispo, F.A.G. (2013). *Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Recicladas Temperadas com Emulsão Betuminosa*, Tese de Mestrado, Universidade da Beira Interior, Covilhã.
- Bocci, M., Grilli, A., Cardone, F., Graziani, A. (2011). A study on the mechanical behaviour of cement-bitumen treated materials, *Construction and Building Materials*, Vol. 25, pp. 773-778.
- Branco, D.T.F. (2013). *Estudo de Misturas Betuminosas Semi-Temperadas por Injeção de Água*, Tese de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães.
- Branco, F., Pereira, P., Santos, L.P. (2011). *Pavimentos Rodoviários*, Livraria Almedina, Coimbra, Portugal.
- Carvalho, T., Colas, M. (2013). Microaglomerados a frio, *7º Congresso Rodoviário Português - Novos Desafios para a Atividade Rodoviária*, Lisboa.
- Castro, S.F. (2011). *Misturas Asfálticas com Incorporação de Cal: Análise Volumétrica e Mecânica*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Costa, G.F. (2012). *Análise dos Critérios de Aceitação/Rejeição do Caderno de Encargos Tipo Obra da EP para Pavimentação*, Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

Dourado, I.N. (2013). *Avaliação da Aplicabilidade de Cinzas de Fundo de Resíduo Sólido Urbano (RSU) em Camadas de Pavimento*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Duarte, R.M.B. (2010). *Aplicação das Normas Europeias nas Misturas Betuminosas*, Tese de Mestrado, Universidade do Porto, Porto.

EP (2009). *Caderno de Encargos Tipo Obra, Capítulos 14.03 e 15.03 (Pavimentação)*, Estradas de Portugal, SA, Lisboa.

Go Green (2012). *Micro-Paving Cold Mix Asphalt*, Go Green Industrial; <http://www.go-green.com.cn/ProjectDetail.aspx?CompanyProjects2Id=2-.VvLbhuKLSUK>; Acedido em 13 de março de 2016.

Gorski, C.M.F.M. (2010). *Estabilização de Solos Argilosos com Ligante Hidráulico LIPIDUR DS*, Universidade da Beira Interior, Covilhã.

Hashemian, L., Kavussi, A., Aboalmaali, H.H. (2014). Application of Foam Bitumen in Cold Recycling and Hydrated Lime in Airport Pavement Strengthening, *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 1, pp. 164-171.

Jiménez, F.E.P. (2007). *Manual de Pavimentação - Cepsa*.

Mendes, S.F. (2011). *Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas a Aplicar em Infra-Estruturas de Transportes*, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.

Minhoto, M.J.C., Pais, J.C., Pereira, P.A.A. (2002). A optimização das misturas betuminosas com betume modificado com borracha, *2º Congresso Rodoviário Português* Lisboa, pp. 257-268.

Modarres, A., Ayar, P. (2014). Coal waste application in recycled asphalt mixtures with bitumen emulsion, *Cleaner Production*, Vol. 83, pp. 263-272.

Montanari, R.M. (2007). *Estudo do Comportamento Mecânico de Misturas Betuminosas a Frio e a Quente para Fins de Pavimentação de Vias*, Tese de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

Monte, M.A.V.d. (2012). *Aplicação de Solo-Cimento em Pavimentos Flexíveis*, Universidade do Porto, Porto.

Nunes, M.G.F. (2008). *Reciclagem de Pavimentos "in situ" a Frio com Emulsão Betuminosa – A Experiência Portuguesa*, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.

Pais, J., Luzia, R., Santos, L.P., Gardete, D. (2008). Ensaios Laboratoriais para Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente, *5º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia*, Maputo, Moçambique.

Pais, J., Pereira, P., Azevedo, M.C.M. (2000). Ensaios Mecânicos para a Caracterização de Misturas Betuminosas, *1º Congresso Rodoviário Português - Estrada 2000*, Lisboa.

Pereira, F.J.Q. (2009). *Estudo da Sensibilidade à Água de Misturas Betuminosas*, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.

- Pereira, P.D.M. (2014). *Avaliação da Aplicabilidade de solos estabilizados com cinzas ativadas alcalinamente em camadas de pavimentos rodoviários*, Universidade do Minho, Guimarães.
- Rocha, R.A.R. (2011). *Estudo de Misturas Betuminosas Semi-Temperadas*, Tese de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães.
- Santos, J.M.R. (2010). *Materiais Utilizados na Construção de Pavimentos Rodoviários*, Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Silva, A.H.M. (2011). *Avaliação do Comportamento de Pavimentos com Camada Reciclada de Revestimentos Asfálticos a Frio com Emulsão Modificada por Polímero*, Tese de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Ubaldo, M.O., Motta, L.M.G., Fritzen, M.A. (2012). Estabilização de Solos para Pavimentação com Uso de Cinza Volante de RSU, *XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Porto de Galinhas, Brasil.
- UPM (2016). *Cold Mix Asphalt Repair Material - Permanent Pavement & Pothole Repair*, Unique Paving Materials Corporation; <http://www.uniquepavingmaterials.com/asphalt-repair/upm-cold-mix/>; Acedido em 11 de março de 2016.
- Wirtgen (2012). *Tecnologia de reciclagem a frio Wirtgen*, Wirtgen GmbH, Windhagen, Alemanha.